إرتقاء الحياة

الاختراعات العشرة العظيمة للتطور



نيك لين

ارتقاء الحياة

ارتقاء الحياة

الاختراعات العشرة العظيمة للتطور

تأليف

نيك لين

ترجمة

محمد عبد الرحمن إسماعيل

مراجعة

محمد فتحي خضر



ارتقاء الحياة

نيك لين

Life Ascending

Nick Lane

الطبعة الأولى ٢٠١٥م
رقم إيداع ١٦٠٢٦ / ٢٠١٤

مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
إن مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه
٥٤ عمارات الفتح، حي السفارات، مدينة نصر ١١٤٧١، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٢٧٠٦٣٥٢ ٢٠٢ + **فاكس:** ٣٥٣٦٥٨٥٣ ٢٠٢ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: http://www.hindawi.org

لين، نيك.
ارتقاء الحياة: الاختراعات العشرة العظيمة للتطور/تأليف نيك لين.
تدمك: ٩٧٨ ٩٧٧ ٧٦٨ ٠٨٢ ٠

١-الاختراعات

أ-العنوان

٦٠٨,٧

تصميم الغلاف: خالد المليجي.

المحتويات

من أفضل ما قيل عن الكتاب

إذا خرج تشارلز داروين من قبره اليوم، فسأعطيه هذا الكتاب القيِّم حتى يلحق بركب الحياة العلمية الحديثة.

مات ريدلي

نيك لين كاتبٌ من نوعٍ نادرٍ؛ فهو عالم لا يكتفي وحسب بتقديم نظرة شاملة لمجال كامل، وإنما يخبرنا أيضًا بأفكاره المثيرة للاهتمام.

كارل زيمر، مجلة «ساينس»

سردٌ أصيل مبهر! أول فصلَيْن من الكتاب يُمثِّلان أكثر الملخصات التي قرأتُها عن فجر الحياة اتساقًا وإقناعًا ... إنها رحلة تخطف الأنفاس في عالم أعمق الأفكار وأهمها في علم الأحياء. وأي شخص مهتم بالحياة ينبغي عليه قراءة هذا الكتاب. يُوصى بقراءة هذا الكتاب بشدة.

مجلة «نيو ساينتيست»

متخصص في الكيمياء الحيوية، حاصل على جوائز عديدة، يُعِيد بناء تاريخ الحياة من خلال التركيز على أهم عشرة اختراعات للتطوُّر … يمنحنا نيك لين رؤًى حيَّة كاشفة عن طبيعة وجودنا على كوكب الأرض.

مجلة «جود بوك جايد»

كتاب رائع! … تظهر فيه براعة نيك لين بوضوح … كتاب منمَّق متكامل الأركان.

مجلة «بابليشرز ويكلي»

كتاب رائع، ممتع للغاية وسهل الاستيعاب، ويمتلئ بالحماس ولا يتهيَّب مناقشة النقاط الخلافية، بل والأفكار الغريبة … لا يصلح هذا الكتاب لأن يكون كتابًا تقرؤه قبل النوم؛ إذ لن يجعلك تنام.

جراهام كرينز سميث، مجلة «كيمستري وورلد»

نظرة مذهلة على الكيفية التي توصَّلَ بها العلماء إلى فهم التطور؛ وذلك ببراعة تضاهي براعة الطبيعة ذاتها.

مجلة «ساينس نيوز»

مفهوم بارع يُقدَّم بحماس ووضوح يناقض ما يتسم به العلم من تعقيد …

صحيفة «ذا جارديان»

هذا الكتاب مصاغ بشكل جميل، ولدى نيك لين نزعة حقيقية لتقديم المعلومات العلمية في شكل قصصي جذَّاب … كتابٌ آسرٌ بحقٍّ.

الجمعية البريطانية لعلم الأحياء الفلكي

يعرض نيك لين عمليات ذات تعقيد محير بلغة نثرية سَلِسة رشيقة.

مجلة «كيركَس ريفيوز»

سردٌ مدهش مكتوب بلغة جميلة عن أعظم ألغاز الحياة: كيف نشأت؟ وكيف تسير؟ ولماذا تموت الكائنات؟ وكيف تطوَّرَ الوعي؟ إنه كتاب ممتع في قراءته، ويُقدِّم رؤية متبصرة حقيقية للتفكير العلمي الحالي في الألغاز التطورية الكبيرة دون أن يَعلْق في أي صعوبات.

إيان ستيوارت، مؤلف كتاب
«خزانة البروفيسور ستيوارت للألغاز الرياضية»

صورة حية للكيفية التي أثرى بها التطورُ الحياةَ.

صحيفة «ذا جلوب آند ميل» (كندا)

شرح رائع لأحدث الاكتشافات في مجال التطور.

صحيفة «صنداي ستار تايمز» (نيوزيلندا)

كاتب لا يخشى من التفكير بحُرِّية، والتفكير بجدية.

فرانك ويلكزك، الحاصل على جائزة نوبل في الفيزياء لعام ٢٠٠٤

إنه كتاب ممتاز، واسع الخيال … مليء بالمفاجآت … كتاب مذهل لكل من يهتم بالحياة وبالتطور.

لويس وولبرت، مجلة «نيتشر»

بوضوح وحماس، يُقدِّم لين الحججَ والبراهينَ القوية بطريقته السلسة؛ ليظهر كيف نشأت المكونات المهمة للحياة المعقدة وآلياتها.

صحيفة «ذا نيويورك تايمز»

هذا كتابٌ علميٌّ لا يغش أحدًا؛ فتركيبته منطقية، وصياغته ذكية، وقد تمَّتْ معالجة الأسئلة العويصة بتركيز وبشكل مباشر.

صحيفة «ذا جارديان»

أُهدي هذا الكتاب لأمي وأبي.

الآن بعد أن أصبحتُ أبًا، أُقدِّر كلَّ ما فعلتماه من أجلي أكثر من ذي قبل.

شكر وتقدير

لم يكن هذا الكتاب ليخرج إلى النور بمجهودي الفردي فحسب. ففي معظم الوقت كان ابناي الصغيران، إنيكو وهوجو، في المنزل وقد أضفى وجودُهما — الذي لم يكن مساعدًا لي دائمًا على التركيز — المعنى والسرور على كل كلمة كتبتها. أما زوجتي، د. أنَّا هيدالجو، فقد ناقشت معي كل موضوع وكل فكرة وكل كلمة، وكثيرًا ما كانت تُقدِّم وجهات نظر جديدة، وتحذف حشو الكلام بمقص لا يرحم. ولقد تعودت على أن أعتمد على صدق حكمها، العلمي والأدبي، وحين كنت أجادلها بغية الوصول إلى الحقيقة كان يتبين لي أنني كنت مخطئًا، أما الآن فأسارع بتقبُّل نصحها. كان هذا الكتاب سيخرج بصورة أسوأ كثيرًا مما هو عليه لولاها، ويُعزى الكثير من إيجابياته إليها.

فضلًا عن هذا، فقد أجريتُ الكثيرَ من المحادثات المحفزة للفكر عن طريق البريد الإلكتروني مع شخصيات من جميع أنحاء العالم، في جميع أوقات النهار والليل، وحاولتُ أن أُغطِّي جميع الأفكار ووجهات النظر والمفاهيم التي وصلتني من متخصصين في مجالات علمية متعددة ومتشعبة. ومع أنني أتبع دومًا مساري الخاص، فإنني أُقدِّر بالمثل كرمهم وخبراتهم تقديرًا عظيمًا. وإنني أُوَجِّه الشكر بصفة خاصة إلى الأساتذة الجامعيين: بيل مارتن بجامعة هاينريش هايني في دوسلدورف، وجون أَلِن في كلية كوين ماري؛ جامعة لندن، ومايك راسل؛ الذي يعمل الآن بمشروع الدفع النفاث التابع لوكالة ناسا في جامعة كالتك. وجميعهم مفكرون أقوياء وأُصلاء في فكرهم، وأنا مَدِينٌ لهم لما بذلوه من وقتهم وتشجيعهم، بل ولِمَا وجَّهُوه من كلماتِ نقدٍ شديدة، وما استلهمتُه منهم من حب للعلم. وكلما خبا حماسي كنتُ أتلقَّى منهم جرعة منشطة في صورة لقاء أو رسالة بالبريد الإلكتروني.

لكني لستُ مَدِينًا لأولئك الأساتذة وحدهم، فأنا شديد الامتنان أيضًا لعدد من الباحثين الآخرين لتوضيحهم أفكارهم لي، ولقراءتهم وتعليقهم على فصول الكتاب. ولقد استفاد كلُّ فصل من الكتاب من كلمات النقد البنَّاء التي تلقيتُها من اثنين على الأقل من المتخصصين في حقل من حقول المعرفة. وإنني أشكر كلًّا من: البروفيسور جوستافو بارخا من جامعة كمبلوتنسي بمدريد، والبروفيسور بوب بلانكنشيب بجامعة واشنطن، والبروفيسور شيلي كوبلي بجامعة كولورادو، ود. جويل داكس بجامعة ألبرتا، والبروفيسور ديريك دنتون بجامعة ملبورن، والبروفيسور بول فالكوفسكي بجامعة روتجرز في نيوجرسي، والبروفيسور هيو هكسلي بجامعة برانديس، ماساتشوستس، والبروفيسور مارسيل كلاسين بالمعهد الهولندي لعلم البيئة، والبروفيسور كريستوف كوخ في جامعة كالتك، ود. يوجين كونين بهيئة المعاهد القومية للصحة في ماريلاند، والبروفيسور بافل كوتييا بالجامعة الياجيلونية ببولندا، والبروفيسور مايكل لاند بجامعة ساسكس، والبروفيسور بيورن ميركر بجامعة أوبسالا، والبروفيسور سلفادور مونكادا بكلية لندن الجامعية، والبروفيسور خوزيه موساكيو بجامعة نيويورك، والبروفيسور سالي أوتو بجامعة كولومبيا البريطانية، والبروفيسور فرانك سيباخر بجامعة سيدني، ود. لي سويتلاف بجامعة أكسفورد، ود. جون تيرني والبروفيسور بيتر وارد بجامعة واشنطن. وأي أخطاء وردت بالكتاب إنما هي مسئوليتي وحدي.

كما أشكر أفراد عائلتي سواء هنا أو في إسبانيا لما قدَّموه لي من حب ودعم، ولا سيما والدي الذي اقتطع من وقته الذي كرَّسَه لتأليف بعض الكتب عن التاريخ؛ لكي يقرأ جميع فصول الكتاب تقريبًا ويُعلِّق عليها، متغلبًا على كراهيته لموضوع جزيئات المادة. كما أُعرِب عن امتناني كذلك لمجموعة من أقرب أصدقائي الذين ما زالوا يقرءون فصول كتابي الثالث ويُعلِّقون عليها. وأشكر بصفة خاصة مايك كارتر الذي شملني بكرمه حتى في أحرج الأوقات، وأندرو فيليبس لمناقشاته المحفزة وتعليقاته الرقيقة، وبول أسبوري الذي لازمني في كثير من حركاتي وسكناتي وخطبي وجولاتي المختلفة. وبصفة أعم أُقدِّم شكري للبروفيسور باري فولر لمصاحبته لي ومناقشاته المنتظمة معي عن العلوم فترة طويلة، والبروفيسور كولن جرين لاهتماماته القوية ولإيمانه بقدراتي حينما كنت محتاجًا لذلك، ود. إيان أكلاند سنو لحماسه غير المشروط ولتذكيره لي على فترات منتظمة بأنني محظوظ، ود. جون إمسلي لمحادثاته الكثيرة المحفزة عن الكتابة العلمية على مَرِّ السنوات، ولمساعدته لي على الخوض في هذا المجال كاتبًا، والبروفيسورين إريش وأندريا جنايجر

اللذين غمراني بكرمهما الزائد، والسيد ديفاني والسيد آدامز، وهما مُدرِّسان كانا نبراسين لي، وبَذَرا في حياتي منذ سنين عديدة بذور حُبِّي لعلمَيِ الأحياء والكيمياء.

وأخيرًا أشكر المحررَيْن أندرو فرانكلين وأنجيلا فون دير ليبِّي بدارَيْ نشر بروفايل ودبليو دبليو نورتن، اللذين لم يبخلا عليَّ بالدعم والإيمان بفائدة هذا الكتاب منذ البداية، كما أشكر إدي ميتسي لذوقه المرهف ومعرفته الدقيقة بمجال تحرير النُّسَخ، وكارولين داوناي، وكيلتي في يونايتد إيجنتس التي كانت مستعدة دائمًا لتشجيعي بكلمة رقيقة دون أن تتخلَّى عن آرائها الراسخة.

لندن ٢٠٠٩

مقدمة

الاختراعات العشرة العظيمة للتطور

في جوف الفضاء المظلم، تلمع الأرض ككرة بلونيها الأزرق والأخضر. لم تُتَحْ فرصة معايشة إحساس رؤية الأرض من القمر وما وراءه إلا لعددٍ قليلٍ فقط من الناس، ومع هذا فقد ظَلَّ الجمال الرقيق للصور التي أرسلوها إلى الأرض محفورًا في الأذهان على امتداد جيل كامل. لا شيء يُقارَن بهذه الصورة. إن صراعات البشر التافهة على الحدود وعلى النفط والأديان تتلاشى عند معرفة أن هذه الكرة الحية المحاطة بخواء لا نهائي هي موطننا المشترك، بل وأكثر من هذا؛ الموطن الذي نتشارك معه، وندين له بأكثر اختراعات الحياة روعة.

لقد حوَّلَتِ الحياةُ كوكبَنا من صخرة قاحلة متَّقِدة كانت ذات مرة تَدُور حول نجم يافع إلى عالمنا المنتصب كمنارةٍ مضيئةٍ تُرى من الفضاء. لقد منحَتِ الحياةُ كوكبَنا اللونين الأخضر والأزرق؛ وذلك حين نظَّفَتِ البكتيريا القائمةُ بعملية البناء الضوئي المحيطاتِ وهواءَ الغلاف الجوي وملأتْها بالأكسجين. وبفَضْل هذا المصدر الجديد القويِّ للطاقة، تفجَّرَتِ الحياةُ بأزهارها المتفتِّحة المتمايلة، والمرجان بتركيبه المُعقَّد الذي يخفي الأسماك الذهبية الرشيقة، والوحوش الضخمة القابعة في الأعماق المظلمة، والأشجار السامقة التي تشق عنان السماء، والحيوانات الصاخبة المتحركة الناظرة لما حولها. ووسط كل هذا، تُحرِّكنا جميعًا تلك الألغازُ غير المحكية الكامنة وراء هذا الخلق، وما نحن سوى تجميعات كونية من الجزيئات تشعر وتفكر وتتعجب وتتساءل عن الكيفية التي جئنا بها إلى هنا.

ولأول مرة في تاريخ كوكبنا، صرنا نعرف. ليست هذه بمعرفة خاصة، أو حقيقة منقوشة على لوح حجري، بل هي ثمرة ناضجة لمسعى البشر الأعظم، مسعانا خلف معرفة وفهم العالم الحي المحيط بنا والكامن داخلنا. اكتسبنا بطبيعة الحال فهمًا عامًّا للأمر منذ وقت داروين، الذي نشر كتابه «أصل الأنواع» منذ ١٥٠ عامًا. ومنذ داروين نَمَتْ معرفتنا بالماضي ليس فقط بفضل الحفريات التي تملأ الفجوات، بل أيضًا بفهمنا للبنية الدقيقة للجينات، وهو الفهم الذي يقوم عليه الآن كل تفصيلة من تفاصيل الحياة المعقدة. ومع هذا، ففي العقود الأخيرة وحسبُ بدَأْنا في الانتقال من النظريات والمعرفة المجردة إلى الصورة الحية المُفصَّلة للحياة والمكتوبة بلغةٍ بدَأْنا منذ وقت حديث للغاية في فَكِّ طلاسمها، وتحمُّل مفاتيح فهم العالم من حولنا وأيضًا فهم الماضي البعيد.

إن القصة المكتشفة أكثر تأثيرًا، وأكثر إلحاحًا، وأكثر تعقيدًا من أي قصة عن الخَلْق. لكن، شأن أي قصة عن الخلق، هي قصة طفرات وتغيُّرات مفاجئة مذهلة، تفجر للاختراعات التي غيرت وجه كوكبنا ومحت الثورات السابقة بطبقات جديدة من التعقيد. إن الجمال الهادئ الذي يبدو عليه كوكبنا من الفضاء يخفي التاريخ الحقيقي لهذا الكوكب، ذلك التاريخ المليء بالنضال والإبداع والتغيير. ومن قبيل المفارقة أن تعكس صراعاتُنا التافهةُ ماضيَ كوكبنا المضطرب، وأننا وحدنا مُفسِدِي الأرض من نستطيع الارتقاء فوقها لنرى الوحدة الجميلة للكوكب ككلٍّ.

تبلور السواد الأعظم من هذا الحراك الذي مَرَّ به كوكبنا بفعل عددٍ قليلٍ من الاختراعات التطورية؛ اختراعات غَيَّرَت العالم وفي النهاية مكَّنَتْنا من الحياة. يجب أن أوضح أنني لا أود أن أعني ضمنًا من وراء كلمة «اختراع» وجود مخترع متعمد. يُعرِّف قاموسُ أكسفورد الاختراعَ بأنه: «الاستحداث أو الإنتاج الأصلي لطريقة أو وسيلة جديدة لِعَمَلِ شيءٍ ما، لم تكن معروفة من قبل، ومن مرادفاتها الابتداء والابتداع.» ليس للتطور بصيرة مستقبلية، ولا يخطط للمستقبل. فما من مخترع، ولا تصميم ذكي. ومع ذلك، يُعرِّض الانتقاءُ الطبيعي جميعَ السمات لأكثر الاختبارات قسوة، وصاحب التصميم الأفضل يفوز. إنه مختبر طبيعيٌّ يستخفُّ بالمسرح البشري، ويمحص تريليونات الفوارق الضئيلة في الوقت نفسه، مع كل جيل بعينه. التصميم موجود حولنا في كل مكان، وهو نتاج عمليات عمياء لكن مبدعة. عادة ما يتحدث التطوريون على نحو غير رسمي عن الاختراع، ولا تُوجَد كلمة أفضل منها تُعبِّر عن الإبداع المذهل للطبيعة. إن اكتساب المعرفة عن الكيفية التي حدث بها كل هذا هو الهدف المشترك بين جميع العلماء، بغضِّ النظر عن معتقداتهم الدينية، وهو أيضًا هدف أي شخص يهتم بوجودنا.

هذا الكتاب يدور حول أعظم اختراعات التطور، وكيف غيَّرَ كل اختراع منها من وجه العالم الحي، وكيف تعلمنا نحن البشر أن نقرأ هذا الماضي ببراعة تضاهي براعة الطبيعة ذاتها. إنه احتفاء بقدرة الابتكار العجيبة للحياة، وبقدرتنا نحن أيضًا. وهو يستعرض، في الواقع، قصة وجودنا الطويلة؛ أبرز المعالم القائمة على امتداد هذه الرحلة الملحمية بدايةً من أصل الحياة وحتى حياتنا وموتنا نفسيهما. إن نطاق هذا الكتاب واسع، وسنتعرَّض من خلاله للحياة بطولها وعرضها؛ من منشئها في الفوهات البحرية العميقة وحتى الوعي البشري، ومن البكتيريا الدقيقة إلى الديناصورات العملاقة. وسنتعرض لمختلف العلوم؛ من الجيولوجيا والكيمياء إلى التصوير العصبي، ومن فيزياء الكم إلى علم الكواكب. كما سنتعرض لنطاق الإنجازات البشرية؛ من أكثر العلماء شهرة في التاريخ إلى الباحثين الذين لم يُعرَفوا بعد والذين قد يُكتَب لهم يومًا ما أن يصيروا من المشاهير.

بطبيعة الحال قائمة الاختراعات الواردة هنا ذاتية تمامًا، وكان من الممكن أن تضم اختراعات مختلفة، بيد أنني طبَّقْتُ أربعة معايير رأيتُ أنها تحكم عملية الانتقاء في نطاق الأحداث القليلة المحورية في تاريخ الحياة.

المعيار الأول: هو أن يتسبب الاختراع في إحداث ثورة في العالم الحي، ومن ثم الكوكب ككلٍّ. تحدثت عن البناء الضوئي بالفعل، الذي حوَّلَ الأرض إلى الكوكب العامر بالطاقة والغني بالأكسجين الذي نعرفه (ودون هذه العملية كان من المستحيل للحيوانات أن تُوجَد). التغيرات الأخرى أقل بروزًا، لكنها لا تقل في أثرها. ثمة اختراعان كان لهما أوسع الأثر؛ وهما: الحركة التي مكَّنَتِ الحيوانات من أن تهيم بحثًا عن الطعام، والبصر الذي غيَّرَ من شخصية جميع الكائنات الحية وسلوكها. ومن المحتمل أن التطور المفاجئ للعين، منذ نحو ٥٤٠ مليون عام، قد أسهم بقدر ليس باليسير في الظهور المفاجئ للحيوانات في موضعها الملائم في سجل الحفريات، والمعروف بالانفجار الكمبري. وسأناقش التبعات المزلزلة لكل اختراع في مقدمة الفصل الذي يتناوله.

المعيار الثاني: هو ضرورة أن يكون للاختراع أهمية استثنائية اليوم. أَفْضَل الأمثلة هي التكاثر الجنسي والموت. ولقد وُصِف التكاثر الجنسي بأنه السخافة الوجودية العظمى، وذلك إذا تجاهلنا كل ما يرتبط بالجنس من أفكار، من الخوف إلى ابتغاء النشوة، والتركيز فقط على آليات التكاثر الجنسي الخاصة بين الخلايا. إن ما يدعو كل تلك الحيوانات، بل وحتى النباتات، إلى الانغماس في سلوكيات التكاثر الجنسي مع أنه كان بمقدورها أن تنتج نسخًا من نفسها في هدوء هو لغز؛ لغز صِرْنا الآن قريبين جدًّا من الإجابة عنه. لكن

إذا كان التكاثر الجنسي هو السخافة الوجودية العظمى، فلا بد أن الموت هو السخافة اللاوجودية العظمى. لِمَ نكبر في العمر ونموت، ونعاني على مَرِّ الطريق من أبشع الأمراض وأبغضها؟ هذا الاهتمام الحديث لا تمليه قوانين الديناميكا الحرارية ولا القوانين القاضية بتعاظم الفوضى والفساد؛ فليس كل الكائنات الحية تهرم، وحتى تلك التي تهرم يمكنها التوقف عن ذلك. سنرى أن التطور قد مَدَّ المدى العمري للحيوانات بقدر كبير، مرارًا وتكرارًا. فالحبة المضادة للشيخوخة ليست بخرافة.

المعيار الثالث: هو أن كل اختراع يجب أن يأتي نتيجة مباشرة للتطور بواسطة الانتقاء الطبيعي وليس، مثلًا، التطور الثقافي. أنا متخصص في الكيمياء الحيوية، وليس لدي من جديد أضيفه بشأن اللغة أو المجتمع. ومع هذا، فإن ركيزة كل ما حققناه، كل ما هو بشريٌّ، هو الوعي. من الصعب تصوُّر أي نوع من اللغة المشتركة أو المجتمع لا يقوم على القيم أو الفهم أو المشاعر المشتركة؛ تلك المشاعر التي لا تُعبِّر عنها الكلمات كالحب والسعادة والحزن والخوف والاشتياق والأمل والإيمان. وما دام العقل البشري تطوَّرَ، فعلينا أن نُفسِّر كيف يمكن للتواصل العصبي داخل المخ أن يؤدي إلى الإحساس الروحي غير الملموس، إلى قوة المشاعر الذاتية. أرى أن هذه مشكلة بيولوجية، وإن كانت مربكة، وسأحاول تفسير ذلك في الفصل التاسع. وبهذا يكون الوعي أحد الاختراعات العظيمة، بينما اللغة والمجتمع ليسا كذلك؛ لأنهما ناتجان بالأساس عن التطور الثقافي.

معياري الأخير: هو ضرورة أن يُمثِّل الاختراع رمزًا بارزًا للتطور في حد ذاته بصورة ما. ربما يُعَدُّ الكمال المفترض للعين هو التحدي التقليدي؛ إذ يعود إلى عصر داروين وما قبله. ومنذ ذلك الوقت تَمَّ التعرض لهذا الموضوع عدة مرات، وبطرق عديدة، لكن التزايد الهائل في المعلومات الخاصة بالجينات في العقد الأخير يُقدِّم لنا تحديًا جديدًا، وغير متوقع. يُعَدُّ لولب الحمض النووي الريبوزي المنقوص الأكسجين (الدي إن إيه) المزدوج الملتف حول ذاته أعظم رموز عصر المعلومات الذي نعيش فيه. كما أن منشأ الخلية المعقدة (الخلية حقيقية النواة) يُعَدُّ رمزًا بارزًا هو الآخر، وإن كان معروفًا بين العلماء أكثر منه بين العامة. ظل هذا المَعلَم البارز أحد أهم الموضوعات التي يجري النقاش حولها بين التطوريين على مدار العقود الأربعة الماضية، وله أهمية عظيمة في مسألة مدى انتشار الحياة المعقدة في أرجاء الكون. يتعامل كل فصل على حدة مع قضايا بارزة مثل هذه. في البداية، ناقشت قائمتي مع صديق لي، وقد اقترح عليَّ أن تكون «الأمعاء» رمزًا للحيوانات، عوضًا عن الحركة. هذه الفكرة قد لا تفي بمعيار الرمز البارز؛ ففي رأيي — على الأقل —

قوة العضلات رمز بارز — فقط فكِّرْ في عظمة الطيران — أما الأمعاء، فبدون قوةٍ تُحرِّكها ما هي إلا نفاخات؛ أعمدة متمايلة من الأحشاء الملتصقة بصخرة. وهي بهذا ليست رمزًا بارزًا.

بالإضافة إلى هذه المعايير الرسمية، كان على كل اختراع أن يأسر خيالي. فهذه هي الاختراعات التي أردت أنا نفسي، بوصفي إنسانًا حريصًا على المعرفة، أن أفهمها. كتبت عن بعض هذه الاختراعات من قبل، وأردت أن أتعرض لها ثانية على نطاق أوسع، وهناك اختراعات أخرى، على شاكلة الدي إن إيه، لها جاذبية آسرة لكل العقول المحبة للمعرفة. إن الكشف عن الأدلة المدفونة داخل بنية الدي إن إيه لهو من أعظم قصص حل الألغاز العلمية على مدار نصف القرن المنصرم، ومع هذا فلم يُعرَف عنه سوى القليل، حتى بين العلماء أنفسهم. آملُ أن أكون قد نجحت في توصيل بعضٍ من حماسي حيال هذا المسعى. مثال آخر: هو الدم الحار. إذ إنه لا يزال مسرحًا لخلاف محتدم؛ نظرًا لعدم اتفاق الرأي حول ما إذا كانت الديناصورات حيوانات قاتلة نشطة ذات دم حار أم عظايا عملاقة تميل للكسل، وحول ما إذا كانت الطيور ذات الدم الحار قد تطورت مباشرة من أقرباء الديناصور تي ريكس المقربين أم أنه لا علاقة تربطها على الإطلاق مع الديناصورات. فلن أجد فرصة أفضل من هذه لمراجعة الأدلة بنفسي!

لدينا إذن قائمة. سنبدأ بأصل الحياة نفسها، وننتهي بموتنا وباحتمالات الخلود، ونمر في طريقنا بأهم المعالم البارزة؛ وهي: الدي إن إيه، والبناء الضوئي، والخلايا المعقدة، والتكاثر الجنسي، والحركة، والبصر، والدم الحار، والوعي.

لكن قبل أن نبدأ، يجب أن أتحدث قليلًا عن الفكرة الأساسية المهيمنة على هذه المقدمة؛ «اللغات» الجديدة التي قدمت مثل هذه الرؤى في أعماق التاريخ التطوري. حتى وقت قريب، كان هناك سبيلان رئيسيان لمعرفة الماضي: الحفريات، والجينات. ولكلٍّ منهما قدرة هائلة على بَثِّ الحياة في الماضي، لكن لكلٍّ منهما نقائصه. إن «الفجوات» المفترضة في سجل الحفريات مبالغ في أهميتها كثيرًا، والعديد منها تَمَّ رأبه بعملٍ شاقٍّ على مدار ١٥٠ عامًا منذ أن قلق داروين بشأنها. المشكلة هي أن الحفريات، بفعل الظروف نفسها التي أدَّتْ إلى الحفاظ عليها، تعجز عن أن تمدنا بمرآة صادقة للماضي. وحقيقة تمكننا من جمع هذا الكم من المعلومات منها هي أمر استثنائي. وبالمثل، تُمكِّننا مقارنةُ تفاصيل التتابعات الجينية من بناء شجر للأنساب، الأمر الذي يبيِّن لنا كيفية ارتباطنا بالكائنات الأخرى. لسوء الحظ، من الحتمي أن تفترق الجينات لدرجة ألَّا يصير هناك أي شيء مشترك بينها؛

ففيما وراء نقطة معينة يصير الماضي، كما نقرؤه بواسطة الجينات، مشوَّهًا. لكن تُوجَد طرق فعالة يُمْكِنها تجاوُزُ الجينات والحفريات حتى أعمق أعماق الماضي، وهذا الكتاب يُعَدُّ في جزء منه احتفاءً ببراعة هذه الطرق.

دعني أعطيك مثالًا، وهو من الأمثلة المفضَّلة لديَّ، لم تُتَح لي فرصة الحديث عنه في الكتاب على النحو الملائم. يدور المثال حول أحد البروتينات (أو الإنزيمات أو العوامل المحفزة واسمه سترات سينثاز) المحورية في الحياة، وهو موجود لدى جميع الكائنات الحية، من البكتيريا إلى الإنسان. جَرَتْ مقارنة هذا الإنزيم في نوعين مختلفين من البكتيريا؛ أحدهما يعيش في الفوهات الحرمائية شديدة الحرارة، والثاني في القطب الجنوبي المتجمد. التتابعات الجينية التي تحمل شفرة هذين الإنزيمين مختلفة؛ إذ إنها تباعدت بعضها عن بعض إلى درجة صارت معها متمايزة تمامًا. ونحن نعلم أنها تباعدَتْ من خلال سلف مشترك؛ لأننا نرى طيفًا من المراحل الوسيطة في البكتيريا التي تعيش في الظروف المعتدلة. لكن من منظور التتابعات الجينية وحدها، لا يمكن قول ما هو أكثر من ذلك. لقد تباعد النوعان بالتأكيد لأن ظروفهما المعيشية مختلفة، لكن هذه معرفة نظرية مجردة، معرفة جامدة ذات بعدين فقط.

لكن الآن بوسعنا النظر إلى البنية الجزيئية لهذين الإنزيمين، التي تخترقها الأشعة السينية المكثفة ويفك طلاسمها التقدم الرائع في علم البلوريات. البنيتان متناظرتان، تشبه إحداهما الأخرى لدرجة أن كل ثنية وشق، وكل ركن ونتوء في إحداهما موجود على نحو دقيق في الأخرى، في الأبعاد الثلاثة جميعها. قد تعجز العين غير المدربة عن التفريق بين الاثنتين. بعبارة أخرى، بالرغم من استبدال عدد كبير من الوحدات البنائية مع مرور الوقت، فإن الشكل والبنية الإجماليين للجزيء — ومن ثم وظيفته — ظلَّا محفوظَيْن على مَرِّ عملية التطور، كما لو أن هذا الإنزيم كاتدرائية مبنية بالحجر القديم، ويُعاد بناؤها من الداخل بالطوب، لكن دون فقدان التصميم المعماري الكلي. وهنا يأتي كشف مهم؛ أي الوحدات البنائية تُبدَّل ولماذا؟ في بكتيريا الفوهات الحرمائية يكون الإنزيم على أقسى صور الصلابة الممكنة. تترابط الوحدات البنائية عن كثب بعضها مع بعض، من خلال الروابط الداخلية التي تعمل عمل الأسمنت، وبهذا تحافظ على بنية الإنزيم بالرغم من كَمِّ الطاقة المهول الآتي من الفوهات ذات الحرارة القائظة. إنه كالكاتدرائية المبنية بحيث تتحمل الزلازل المتواصلة. في الجليد، الصورة معكوسة. هنا تتسم الوحدات البنائية بالمرونة، وهو ما يسمح بالحركة مع أنها في درجة التجمد، وكأن الكاتدرائية أُعِيدَ بناؤها على رولمان بلي

بدلًا من قوالب الطوب. إذا قارنت بين نشاط الإنزيمين في درجة حرارة قدرها ٦ درجات مئوية، فستجد أن الإنزيم البارد أسرع بتسع وعشرين مرة، لكن عند درجة حرارة ١٠٠ درجة مئوية سيتهشم ذلك الإنزيم تمامًا.

الصورة التي تظهر أمامنا صورة حية وثلاثية الأبعاد؛ فقد صار للتغيرات في تتابعات الجينات معنى؛ فهي تحفظ بنية الإنزيم ووظيفته، بغض النظر عن الحاجة للعمل تحت ظروف مختلفة تمامًا. يمكننا الآن أن نرى ما حدث بالفعل على مدار عملية التطور، وسببه. لم يَعُد الأمر يقتصر على إشارات جامدة، بل صرنا نحصل على رؤًى حقيقية.

وبالمثل، يمكن الحصول على رؤًى حيَّة بشأن ما حدث بالفعل بالاستعانة بأدوات بارعة أخرى متاحة في الوقت الحالي. على سبيل المثال، يُمكِّننا علم الجينوم المقارن ليس فقط من مقارنة الجينات بعضها ببعض، بل مقارنة جينومات كاملة، تحوي آلاف الجينات، بين مئات الأنواع المختلفة. ومجددًا، لم تُتَحْ هذه الطريقة إلا في السنوات القليلة الماضية، مع زيادة أعداد تتابعات الجينومات المكتشفة. بعد ذلك يمكننا علم البروتيومات من الحصول على طيف البروتينات العاملة داخل الخلية في أي وقت بعينه، ومن فهم كيفية التحكم في هذا الطيف بواسطة عدد صغير من الجينات المنظِّمة التي ظلت محفوظة على امتداد دهور من التطور. تمكننا البيولوجيا الحوسبية من تحديد الأشكال والبنى المحددة، المهيمنة، التي تُوجَد دومًا في البروتينات، بالرغم من تغيُّر الجينات. يمكِّننا التحليل النظائري للصخور أو الحفريات من إعادة بناء تغيرات الماضي في الغلاف الجوي وفي المناخ. كما تمكننا تقنيات التصوير من رؤية وظيفة الخلايا العصبية في المخ أثناء عملية التفكير، أو إعادة بناء البنية ثلاثية الأبعاد الخاصة بالحفريات الميكروسكوبية المطمورة داخل الصخور دون التأثير عليها. وهكذا دواليك.

ليس أيٌّ من هذه التقنيات بجديد. الجديد هو التعقيد والسرعة والتوافر الذي صارت تتسم به. وعلى غرار «مشروع الجينوم البشري» الذي سار بسرعة متزايدة متقدمًا على الموعد المحدد له، فإن السرعة التي تُجمَع بها البيانات تذهل العقول. أغلب هذه المعلومات ليس مكتوبًا بلغة كلاسيكية كتلك الخاصة بعلم الوراثة السكاني أو علم الحفريات، بل بلغة الجزيئات، على المستوى الذي يحدث عنده التغيُّر الحقيقي في الطبيعة. وبهذه الوسائل الجديدة ظهر للنور قطاع جديد من العلماء التطوريين، القادرين على رصد آليات عمل التطور وقت حدوثها. الصورة المرسومة على هذا النحو تحبس الأنفاس من فرط اتساع تفاصيلها ونطاقها، الذي يتراوح من المستوى دون الذري إلى المستوى الكوكبي.

ولهذا السبب قلت إننا، وللمرة الأولى في التاريخ، صرنا نعلم. لا شك أن قدرًا كبيرًا من معرفتنا المتنامية مؤقت، بيد أنه عامر بالحياة والمعنى. إنه لأمر ممتع أن نعيش في وقتنا هذا، الوقت الذي صرنا نعرف فيه الكثير، ومع ذلك لا يزال بإمكاننا التطلع إلى المستقبل لمعرفة ما هو أكثر بكثير.

الفصل الأول

أصل الحياة

من أعماق كوكب الأرض

خلف الليلُ النهارَ في تعاقب سلس. كان النهار يدوم في ذلك الوقت على كوكب الأرض قرابة خمس ساعات أو ست. كان الكوكب يدور في جنون حول محوره، وكان القمر يلوح في السماء ثقيلًا مخيفًا، أقرب بكثير مما هو عليه اليوم؛ ومن ثم بدا أكبر حجمًا. نادرًا ما بدَتِ النجوم ساطعة؛ لأن الغلاف الجوي كان مليئًا بالدخان والضباب والغبار، لكن كثيرًا ما شقَّتْ سماءَ الليل شهبٌ خلابةٌ. أما الشمس، حين كانت تُرى من بين كل هذا الضباب والدخان الثقيل أحمر اللون، فكانت شاحبة وضعيفة وتنقصها القوة التي تتمتع بها الآن وهي في ريعانها. لم يكن بمقدور البشر العيش وقتها، لا لأن أعيننا كانت ستجحظ وتنفجر كما قد يحدث على كوكب المريخ، وإنما لأن رئاتنا لم تكن لتجد أي أكسجين. كنا سنصارع لدقيقة في يأس، ثم نموت اختناقًا.

لم يكن اسم «الأرض» ملائمًا، بل كان من الأفضل أن يُسمَّى الكوكب باسم كوكب «البِحَار». وحتى في يومنا هذا، تُغطِّي المحيطاتُ ثلثَيْ كوكبنا، وتهيمن على المنظر من الفضاء. في الماضي البعيد، كانت الأرض تتكوَّن بالكامل تقريبًا من الماء، خلا بضع جزر بركانية صغيرة الحجم تبرز من بين الأمواج الهائجة. وتحت أسر ذلك القمر القريب، كانت قوى المد جبارة، تصل على الأرجح إلى مئات الأقدام. كان تأثير الكويكبات والمذنبات أقل مما كان عليه الحال في وقت سابق، حين تسبب أكبر الكويكبات في انفصال القمر عن الأرض، لكن حتى في هذه الفترة من الهدوء النسبي كثيرًا ما كانت المحيطات تغلي وتضطرب. كما كانت تغلي من الأسفل أيضًا؛ إذ كانت القشرة الأرضية تمتلئ بالشقوق،

وكانت الصخور المنصهرة تتفجر وتلتوي، وجعلت البراكين للعالم السفلي وجودًا دائمًا على السطح. كان عالمًا يخلو من التوازن، عالمًا من النشاط الذي لا يهدأ، كوكبًا وليدًا محمومًا.

كان هذا هو العالم الذي ظهرت عليه الحياة منذ ٣٨٠٠ مليون عام خلَتْ، ربما بفعل الاضطراب المتواصل للكوكب ذاته. نحن نعلم هذا بفضل قليل من الصخور الدقيقة التي أتتنا من ذلك العهد الغابر واجتازت دهورًا طويلةً من الاضطراب حتى وقتنا هذا. داخل هذه الصخور تقبع أصغر آثار الكربون، التي تحمل في تركيبها الذري طابع الحياة الذي لا يمكن لأحد أن يخطئه. قد يُعَدُّ ذلك دليلًا واهيًا على زعم هائل، ولا يُوجَد إجماع بين الخبراء على هذا الأمر. لكن إذا اجتزنا بضع حِقَبٍ زمنية فسنَجِد أنه بحلول ٣٤٠٠ مليون عام مضَتْ، تصير علامات الحياة جلية أيما جلاء. كان العالم يجيش بالبكتيريا وقتها؛ بكتيريا خلفت علاماتها ليس فقط على صورة آثار من الكربون، بل أيضًا داخل الحفريات الدقيقة ذات الأشكال المتنوعة وداخل صروح الحياة البكتيرية؛ ونقصد بهذا الرقائق الكلسية الطحلبية التي قد يصل ارتفاعها إلى المتر. هيمنت البكتيريا على كوكبنا لنحو ٢٥٠٠ مليون عام أخرى إلى أن ظهرت أولى الكائنات المعقدة في سجل الحفريات. يقول البعض إن البكتيريا لا تزال المهيمنة؛ إذ إن بريق النباتات والحيوانات لا يضاهي البكتيريا في حجم الكتلة الحيوية.

ما السمات التي وُجِدَتْ في الأرض المبكرة وبثت الحياة للمرة الأولى في العناصر غير العضوية؟ أنحن متفردون، أم نادرون للغاية، أم أن كوكبنا ليس أكثر من أحد مليارات الكواكب الحاضنة للحياة والمتناثرة في أرجاء الكون؟ وفق المبدأ الإنساني لا يهم هذا الأمر؛ فإذا كانت احتمالية وجود الحياة في الكون تبلغ واحدًا من مليون مليار، فثمة فرصة إذن أن تظهر الحياة على كوكب واحد في مكان ما من كل مليون مليار كوكب. ولأننا وجدنا أنفسنا على كوكب يستضيف الحياة، فمن البديهي أننا نعيش على كوكب من الكواكب الصالحة للحياة. وبغض النظر عن الندرة الشديدة لفرص وجود الحياة، ففي الكون غير المحدود تُوجَد دومًا احتمالية ظهور الحياة على أحد الكواكب، ومن المؤكد أننا نعيش على أحد هذه الكواكب التي ظهرت عليها الحياة.

إذا كنت ممن لا يقنعون كثيرًا بالإحصائيات — شأني — فإليك إجابة أخرى غير مُرْضِيةٍ طَرَحَها عددٌ من كبار العلماء؛ على غرار فريد هويل وبعده فرانسيس كريك. تقضي هذه الإجابة بأن الحياة بدأت في مكان آخر ثم انتقلت إلى كوكبنا، إما بمحض

الصدفة أو بتدبير من كائنات فضائية ذكية. ربما هذا ما حدث بالفعل — فمَنْ ذا الذي سيخاطر بالقول إن هذا لم يحدث؟! — بيد أن العلماء غير مستعدين للخوض في مثل هذا النوع من التفكير، وهم مُحِقُّون في ذلك. الأمر أشبه بالزعم بأن العلم لا يستطيع الإجابة عن هذا السؤال قبل حتى أن ننظر في إمكانية ما إذا كان بمقدور العلم الإجابة عنه أم لا. إن السبب المعتاد وراء البحث عن الخلاص في مكان آخر من الكون هو الزمن؛ فلم يَمْضِ زمنٌ كافٍ على الأرض ليتطور ذلك التعقيد المذهل للحياة.

لكن من يقول بهذا؟ يخرج علينا العالم الفائز بجائزة نوبل كريستيان دي دوف، الذي لا يقل مكانةً عن سابقيه، برأي صادم تمامًا يقضي بأن حتمية الكيمياء تعني وجوب ظهور الحياة بسرعة. ما يعنيه في الأساس هو أن التفاعلات الكيميائية يجب أن تَحْدُث بسرعة وإلا فلن تَحْدُث على الإطلاق، وإذا احتاج أي تفاعل لآلاف السنين حتى يكتمل، فمن المرجح إذن أن تتبدد كل المواد الداخلة في التفاعل أو تتحلل في غضون هذه الفترة، ما لم تستكمله تفاعلات أخرى أسرع. لا ريب أن أصل الحياة ما هو إلا عملية كيميائية، ومن ثم يسري عليها نفس المنطق؛ أن التفاعل الأصلي للحياة لا بد أنه حَدَثَ على نحو تلقائي وسريع. وهكذا يرى دي دوف أنه من الأكثر ترجيحًا بكثير أن تتطور الحياة في غضون عشرة آلاف عام عن أن تستغرق عشرة مليارات عام كي تتطور.

لا نستطيع مطلقًا أن نعرف كيف بدأت الحياة على الأرض. وحتى إذا نجحنا في إنتاج بكتيريا أو حشرات تزحف خارجةً من مواد كيميائية بأنبوب اختبار، فلن نعرف أبدًا ما إذا كانت الحياة على كوكبنا قد بدأت بهذه الصورة تحديدًا، بل كل ما نعرفه أن هذا التفاعل بعينه يمكنه إنتاج الحياة وأنه قد يكون أكثر ترجيحًا عما كنا نظن من قبل. لكن العلم ليس معنيًّا بدراسة الاستثناءات، بل القواعد، وينبغي للقواعد الحاكمة لظهور الحياة على كوكبنا أن تسري في أرجاء الكون. إن السعي وراء أصل الحياة ليس هدفه إعادة بناء ما حدث في الساعة السادسة والنصف من صباح يوم الخميس قبل الميلاد بـ ٣٨٥١ مليون عام، بل الهدف هو معرفة القواعد العامة التي يجب أن تحكم ظهور الحياة في أي مكان في الكون، خاصة على كوكبنا — المثال الوحيد الذي نعرفه. ومع أن القصة التي سنرسمها قد لا تكون صحيحة في كل تفاصيلها، فإنها حسبما أعتقد مقبولة على نحوٍ واسعٍ. أريد أن أُبيِّن أنَّ أصل الحياة ليس ذلك اللغز العظيم الذي يجري تصويره أحيانًا، وأن الحياة تظهر، ربما بشكل حتمي، من خضم الحِراك الدائم لكوكبنا.

بالطبع ليس العلم معنيًّا بالقواعد وحسب، بل هو معني بالتجارب التي تُفسِّر هذه القواعد أيضًا. تبدأ قصتنا في عام ١٩٥٣، ذلك العام الأسطوري الذي شَهِدَ تتويج الملكة إليزابيث الثانية والوصول لقمة جبل إفرست ووفاة ستالين وتفسير بنية الدي إن إيه وأخيرًا وليس آخرًا، تجربة ميلر–يوري؛ البداية الأيقونية الشهيرة للأبحاث المعنية بأصل الحياة. كان ستانلي ميلر في ذلك الوقت طالب دكتوراه طموحًا يعمل بمختبر العالم الفائز بجائزة نوبل، هارولد يوري، وقد تُوفِّي في عام ٢٠٠٧ وهو يشعر على الأرجح بلمحة من المرارة، وكان لا يزال يدافع عن الآراء التي حمل عبئها بشجاعة على مدار نصف قرن. لكن بغض النظر عن مصير أفكار ميلر الخاصة، فإن إرثه الحقيقي كان ذلك المجال الذي أرسى قواعده على تجاربه الاستثنائية، التي لا تزال نتائجها قادرة على إثارة ذهولنا حتى اليوم.

ملأ ميلر دورقًا زجاجيًّا كبيرًا بالماء وخليط من الغازات؛ وذلك لمحاكاة ما اعتبره التركيب البدائي للغلاف الجوي للأرض. وقد اختار الغازات التي كان من المعتقد (من واقع التحليل الطيفي) أنها تُؤلِّف الغلاف الجوي للمشتري، وهناك افتراض منطقي بأنها كانت متوافرة بكثرة في الغلاف الجوي للأرض في أيامها المبكرة كذلك، وهي تحديدًا النشادر والميثان والهيدروجين. مَرَّرَ ميلر عَبْرَ هذا الخليط شراراتٍ كهربيةً لمحاكاة البرق، ثم انتظر. وبعد بضعة أيام، وبضعة أسابيع، وبضعة أشهر، أخذ عينات من الماء وحلَّلَها كي يُحدِّد ماهية الناتج بالضبط. وقد فاقت النتائج أقصى تصوُّراته جموحًا.

لقد نجح في تحضير حساء بدائي؛ ذلك الخليط شبه الأسطوري من الجزيئات العضوية، الذي يحوي عددًا قليلًا من الأحماض الأمينية، التي تُعَدُّ الوحدات البنائية للبروتينات وأكثر الجزيئات التي ترمز للحياة على الأرجح، وتحديدًا في ذلك الوقت، قبل أن يشتهر الدي إن إيه. والأدهى من ذلك أن الأحماض الأمينية التي تكوَّنَتْ بالفعل في حساء ميلر كانت مطابقة تقريبًا لتلك التي تستخدمها الحياة، وليست مجرد تراكيب عشوائية من مخزون التراكيب المتاحة. بعبارة أخرى، لقد عرَّض ميلر خليطًا بسيطًا من الغازات للتيار الكهربي، وتكوَّنَتِ الوحدات البنائية الأساسية للحياة داخل هذا الخليط. الأمر يبدو وكأنها كانت تنتظر أن تظهر إلى الوجود. وعلى حين غرة بدا أصل الحياة أمرًا بسيطًا. ولا بد أن الفكرة مَسَّتْ وترًا مهمًّا في روح ذلك العصر، خاصة وأنها ظهرت على غلاف مجلة «تايم»، وهو مستوى من الشهرة لم تَحْظَ به أي تجربة علمية من قبل قط.

لكن بمرور الوقت فقدَتْ فكرةُ الحساء البدائي جاذبيتَها. وقد فقدَتْ قبولَها تمامًا حين أوضحت التحاليل التي أُجْرِيَتْ على الصخور القديمة أن الأرض لم تكن غنية قط

بالميثان والنشادر والهيدروجين، على الأقل ليس بعد القصف الكويكبي الهائل الذي تسبب في انفصال القمر عنها. شَقَّ هذا القصفُ الهائلُ غلافَ كوكبنا الجوي للمرة الأولى وأطاح به إلى الفضاء، كما أن عمليات المحاكاة الأكثر واقعية للغلاف الجوي البدائي كانت مخيبة للآمال. جَرِّبْ تمرير تيار كهربي عَبْرَ خليط من ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين مع مستويات بسيطة من الميثان والغازات الأخرى، وستتساقط الجزيئات العضوية المتكونة في تعاسة، ولن يتكوَّن أي حمض أميني تقريبًا. وهكذا صارت فكرة الحساء البدائي أمرًا مثيرًا للفضول لا أكثر، وإن كان بيانًا مُعَبِّرًا عن «إمكانية» تكوين الجزيئات العضوية بواسطة وسائل بسيطة في المختبر.

عادت فكرة الحساء البدائي لدائرة الضوء مجددًا مع اكتشاف العديد من الجزيئات العضوية في الفضاء، وخاصة على المذنبات والكويكبات. بدا أن بعض هذه المذنبات والكويكبات يتألف بالكامل من الثلج الملوَّث بالغبار ومن الجزيئات العضوية، ويحمل نطاقًا مشابهًا على نحو مدهش للأحماض الأمينية التي تكوَّنَتْ داخل الغازات المكهربة. وبالإضافة إلى حقيقة وجودها التي تدعو للدهشة في حد ذاتها، بدا الأمر وكأن هناك شيئًا مميزًا على نحو خاص في جزيئات الحياة؛ مجموعة فرعية صغيرة من المكتبة الشاسعة لكل الجزيئات العضوية الممكنة. الآن اتخذ القصف الكويكبي الهائل معنى جديدًا بالكامل؛ إذ لم يَعُدْ هذا القصف مدمرًا، بل صار المصدر الأساسي لكل المياه والجزيئات العضوية التي تحتاجها الحياة كي تُوجَد. لم يتكوَّن الحساء على كوكب الأرض، بل جاءنا من الفضاء الخارجي. ومع أن أغلب الجزيئات العضوية ستتفكك عند الاصطدام، فإن الحسابات تشير إلى أن عددًا كافيًا منها أمكنه النجاة بحيث يتراكم مُكَوِّنًا الحساء.

حتى إذا لم تحظَ فكرة غرس بذور الحياة من الفضاء الخارجي بتأييد عالم الكونيات فريد هويل، فإن الفكرة مع ذلك تربط أصل الحياة، أو على الأقل أصل الحساء البدائي، بنسيج الكون ذاته. لم تَعُد الحياة مجرد استثناء وحيد، بل صارت ثابتًا كونيًّا جليلًا حتميًّا، شأنه شأن الجاذبية. ولا حاجة لنا بالقول بأن البيولوجيين الفلكيين أحبوا هذه الفكرة، لكن لا يزال العديد منهم يؤيدها؛ فبالإضافة إلى كونها فكرة مرضية، فإنها تمدهم أيضًا بالأمان الوظيفي.

حَظِيَتْ فكرة الحساء بقبول مماثل من جانب علم الوراثة الجزيئي، وخاصة فكرة أن الحياة قائمة على المتضاعفات، وتحديدًا الجينات، المؤلفة من الحمض النووي الريبوزي المنقوص الأكسجين (الدي إن إيه) أو الحمض النووي الريبوزي (الآر إن إيه)، التي تنسخ

نفسها بدقة وتنتقل إلى الجيل التالي (المزيد عن هذا في الفصل التالي). من المؤكد أن الانتقاء الطبيعي لا يمكنه العمل دون وجود نوع من المتضاعفات، ومن الصحيح أيضًا أن الحياة لا يمكنها أن تُطوِّر التعقيد إلا من خلال الانتقاء الطبيعي. وبهذا يكون أصل الحياة من منظور العديد من علماء البيولوجيا الجزيئية هو أصل عملية النسخ نفسها. تتوافق فكرة الحساء مع هذه الفكرة على نحو جيد؛ لأنها من الظاهر توفر كل المقومات التي تحتاجها المتضاعفات للنمو والتطور. ففي الحساء الغليظ الملائم، تأخذ المتضاعفات ما تحتاجه، وتكون مركبات كيميائية (بوليمرات) أكثر تعقيدًا، وفي النهاية تستغل الجزيئات الأخرى لتكوين بنًى مُعقَّدة على غرار البروتينات والخلايا. وفق هذه النظرة، ما الحساء سوى بحر للأبجدية يموج بالحروف التي تنتظر أن يصطادها الانتقاء الطبيعي ويُحوِّلها إلى نصوص ذات معنى.

مع هذا، تُعَدُّ فكرة الحساء البدائي فكرة خبيثة. ليست خبيثة لأنها خاطئة بالضرورة، فمن المحتمل أنه وُجِدَ حساء بدائي بالفعل في وقتٍ ما من الأوقات، وإن كان أخف بكثير مما زُعِم. بل هي خبيثة لأن فكرة الحساء حوَّلَتْ الانتباه بعيدًا عن الأسس الحقيقية للحياة لعقود. خُذْ وعاءً كبيرًا معقمًا من الحساء (أو من زبد الفول السوداني) واتركه لملايين السنين. هل ستظهر الحياة؟ كلا. لِمَ لا؟ لأن محتويات الوعاء إذا تُرِكَتْ لحالها فلن تفعل شيئًا سوى التحلل. وإذا عرضت المحتويات لشحنة كهربية على نحو متكرر، فلن يتحسن الوضع كثيرًا، بل إن الحساء سيتحلل بشكل أسرع. من شأن شحنات البرق الضخمة المتقطعة أن تتسبب في تجمع بعض الجزيئات معًا لتكوِّن كتلًا من الجزيئات، لكن الأكثر ترجيحًا أن تتسبب في تمزيقها إربًا مجددًا. هل بإمكانها تخليق مجموعة من المتضاعفات المعقدة داخل الحساء؟ أشك في هذا. فكما تقول كلمات أغنية «مسافر من أركنسو»: «لا يمكنك الوصول إلى هناك من هنا.» الأمر ليس منطقيًّا من منظور الديناميكا الحرارية وحسب، تمامًا مثلما يستحيل إعادة جثمان ميت إلى الحياة عن طريق تعريضه لشحنة كهربية على نحو متكرر.

إن مصطلح الديناميكا الحرارية هو أحد تلك المصطلحات التي من المحبذ لأي كتاب يزعم مخاطبة غير المتخصصين أن يتجنَّبها، لكنه سيصير أكثر قبولًا إذا نظرنا إليه على ما هو عليه بالفعل: علم «الرغبة». إن وجود الذرات والجسيمات تهيمن عليه أمور مثل «التجاذب» و«التنافر» و«الرغبات» و«تفريغ الشحنات» لدرجة أنه من المستحيل تقريبًا الكتابة عن الكيمياء دون منحها قدرًا ما من التجسيم الشهواني. فالجزيئات «ترغب» في

فقدان الإلكترونات أو اكتسابها، وهي تجتذب الشحنات المعاكسة، وتنفر من الشحنات المشابهة، وتتعايش مع الجزيئات الأخرى ذات الطبيعة المشابهة. يحدث التفاعل الكيميائي على نحو تلقائي إذا رغب كل الشركاء من الجزيئات في المشاركة، أو يمكن إجبارها على التفاعل قهرًا بواسطة قوة أكبر. بالطبع بعض الجزيئات ترغب بالفعل في التفاعل لكنها تعجز عن التغلب على خجلها الفطري، وقد يتسبب قَدْرٌ يسيرٌ من المغازلة في إطلاق دفق هائل من الشهوة؛ تفريغًا للطاقة الصافية. لكن ربما من الأفضل أن أتوقَّف عند هذا الحد.

المغزى مما أقول هو أن الديناميكا الحرارية هي التي تُحرِّك العالم. فإذا لم يرغب اثنان من الجزيئات في التفاعل أحدهما مع الآخر، فسيكون من العسير إقناعهما بذلك، وإذا رغبا في التفاعل فسيحدث هذا، حتى إن استغرقا بعض الوقت للتغلب على خجلهما. إن حياتنا تُحَرِّكها رغبات من هذا النوع. فالجزيئات الموجودة داخل الغذاء ترغب بشدة في التفاعل مع الأكسجين، لكن لحسن الحظ أنها لا تتفاعل معه على نحو تلقائي (إذ إنها خجولة بقدر ما)، وإلا اشتعلَتْ أجسادنا جميعًا. بَيْدَ أن شعلة الحياة — ذلك الاحتراق البطيء الذي يبقينا جميعًا أحياءً — هي بالتحديد تفاعل من هذا النوع؛ فالهيدروجين المنتزع من الغذاء يتفاعل مع الأكسجين كي يطلق الطاقة التي نحتاجها للحياة.[١] وفي جوهرها، تقوم أشكال الحياة كافة على «تفاعل رئيسي» من نوع مشابه: تفاعل كيميائي يرغب في الحدوث، ويطلق الطاقة التي يمكن استخدامها لتشغيل كل التفاعلات الجانبية التي تتألف منها عملية البناء الغذائي. وكل هذه الطاقة، وحياتنا كلها، تقوم على التقاء جزيئين اثنين يفقدان توازنهما تمامًا حين يكون أحدهما مع الآخر؛ وهما: الهيدروجين، والأكسجين. جسمان متعارضان يتوحدان في رباط جزيئي مبارك، ويطلقان دفقًا غزيرًا من الطاقة، ولا يخلفان سوى بركة صغيرة حارة من الماء.

وهذه هي مشكلة الحساء البدائي؛ أنه فاتر من منظور الديناميكا الحرارية. فلا شيء في هذا الحساء تحديدًا يرغب في التفاعل، على الأقل ليس على النحو الذي يرغب الهيدروجين والأكسجين في التفاعل وفقه. لا وجود لاختلال التوازن، لا وجود لقوة محركة تدفع الحياة إلى أعلى وأعلى نحو قمة تل الطاقة شديد الانحدار حتى نصل إلى نقطة تكون البوليمرات المعقدة بحق، على غرار البروتينات والدهنيات وعديدات السكاريد وعلى الأخص الدي إن إيه والآر إن إيه. إن فكرة أن تكون المتضاعفات على غرار الآر إن إيه هي أولى شظايا الحياة، وأنها تسبق أي قوة محركة ديناميكية حرارية، هي حسب كلمات مايك راسل «أشبه بنزع المحرك من السيارة ثم توقُّع أن يقوم الكمبيوتر المعني بالتنظيم بقيادة السيارة.» لكن إذا لم يأتِ المحرك من الحساء، فمن أين أتى إذن؟

جاءنا أول دلائل الإجابة عن هذا السؤال في أوائل سبعينيات القرن العشرين، حين رُصِدَتْ تيارات صاعدة من الماء الدافئ على امتداد أخدود جالاباجوس، على مقربة من جزر جالاباجوس. وعلى نحو ملائم، فإن الجزر التي أوحى تنوُّع الكائنات بها إلى داروين بأصل الأنواع قدمت لنا الآن دليلًا مهمًّا على أصل الحياة نفسها.

لم يحدث الكثير لبضع سنوات. ثم في عام ١٩٧٧، بعد هبوط نيل أرمسترونج على القمر بثماني سنوات، هبطت الغواصة البحرية الأمريكية «ألفين» في الأخدود، باحثة عن الفوهات الحرمائية التي يُفترَض أن تيارات الماء الدافئ انبعثت منها، وبالفعل وجدت هذه الفوهات. لكن مع أن وجود هذه الفوهات لم يكن بالأمر المفاجئ، جاء تنوع الحياة الشديد في الأعماق المظلمة لهذا الأخدود بمنزلة صدمة حقيقية. فهناك كانت تُوجَد الديدان الأنبوبية العملاقة، التي يصل طول بعضها إلى ثماني أقدام، بجوار المحار الصدفي وبلح البحر الذي يصل في حجمه إلى أطباق الطعام. وإذا لم يكن وجود هذه الكائنات العملاقة في أعماق المحيط بالأمر غير المعتاد — فقط فكِّرْ في شكل الحبار العملاق — فإن وفرتها في حد ذاتها كانت أمرًا مذهلًا. كانت كثافة هذه الكائنات في الفوهات البحرية العميقة تضاهي كثافة الكائنات في الغابات المطيرة أو الشعاب المرجانية، مع أن مصدر طاقتها الوحيد هو انبعاثات الفوهات الحرمائية وليس الشمس.

ربما كانت أكثر الأمور إثارة هي الفوهات نفسها، التي سريعًا ما صارت تُدعَى باسم «المداخن السوداء» (انظر الشكل ١-١). وقد تبيَّن أن فوهات أخدود جالاباجوس أعدادها متواضعة مقارنة ببعض حقول الفوهات الأخرى التي يصل فيها عدد الفوهات إلى ٢٠٠ فوهة، والمتناثرة على امتداد أخاديد المحيط الهادئ والأطلسي والهندي. تضخُّ تلك الفوهات المتداعية، التي يصل ارتفاع بعضها لارتفاع ناطحات السحاب، كتلًا من الدخان الأسود في مياه المحيطات السابقة. ليس هذا الدخان دخانًا حقيقيًّا، بل كبريتيد معدني محترق يغزو مياه المحيطات بعد أن يصعد من الصهارة المتقدة بالأسفل، وهو حمضي كالخل، وتصل حرارته إلى ٤٠٠ درجة مئوية تحت الضغط الساحق لأعماق المحيطات قبل أن يتسرب إلى المياه الباردة. الفوهات نفسها تتألف من أملاح معدنية كبريتية على غرار بيريت الحديد (الذي يُعرَف باسم «ذهب الحمقى»)، التي تستقر بعد انبعاثها من الفوهات وتتراكم في ترسيبات سميكة على مساحات واسعة. تنمو بعض الفوهات بمعدلات مذهلة، بما يصل إلى ثلاثين سنتيمترًا في اليوم الواحد، ويمكنها أن ترتفع إلى نحو ستين مترًا قبل أن تتحطم.

بدا هذا العالم العجيب المنعزل أشبه بالجحيم، وكان يمتلئ بالمداخن السوداء التي ينبعث منها الكبريت وغاز كبريتيد الهيدروجين ذو الرائحة الخبيثة. بالقطع لم يكن



شكل ١-١: مدخنة سوداء ذات منشأ بركاني، تصل درجة حرارتها إلى ٣٥٠ درجة مئوية، موجودة بأخدود خوان دي فوكا، شمال شرق المحيط الهادئ. العلامة تساوي ارتفاعًا قَدْرُه متر واحد.

إلا لعقل مضطرب كعقل الرسام هيرونيموس بوش أن يتخيَّل وجود الديدان الأنبوبية العملاقة، التي تفتقر إلى الفم والشرج على حد سواء وأسراب الجمبري عديم الأعين، وهي تحتشد بأعداد لا حصر لها على الحواف الموجودة أسفل الفوهات، في مشهد مذهل غريب وكأنها جماعات من الجراد. ليس الأمر أن الحياة في تلك الفوهات تتحمل هذه الظروف القاسية وحسب، بل إنها لا يمكنها الوجود من الأساس بدونها؛ إذ إنها تزدهر بفضل هذه الظروف. لكن كيف؟

تكمن الإجابة في انعدام التوازن. بينما تتخلل مياه البحر الصهارة الموجودة أسفل المداخن السوداء، تسخن بشدة وتتشبع بالأملاح المعدنية والغازات — أبرزها كبريتيد الهيدروجين — تستطيع بكتيريا الكبريت استخلاص الهيدروجين من هذا الخليط وربطه

بثاني أكسيد الكربون لتكوين المواد العضوية. هذا التفاعل هو أساس الحياة في الفوهات، وهو يسمح للبكتيريا بالازدهار دون وجود مصدر مباشر لضوء الشمس، بَيْدَ أنَّ تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى مادة عضوية يحتاج إلى طاقة، وللحصول على هذه الطاقة تحتاج بكتيريا الكبريت إلى الأكسجين. إن تفاعل كبريتيد الهيدروجين مع الأكسجين يطلق الطاقة التي يقوم عليها عالم الفوهات، وهو مكافئ لتفاعل الهيدروجين مع الأكسجين الذي تقوم عليه حياتنا. تكون نواتج التفاعل هي الماء، شأن التفاعل الآخر، لكن يُضاف إليه عنصر الكبريت؛ الكبريت الخالص الذي يمنح بكتيريا الكبريت اسمها.

جدير بالذكر أن بكتيريا الفوهات لا تستخدم الحرارة أو غيرها من السمات الأخرى للفوهات على نحوٍ مباشر، والاستثناء الوحيد لهذا هو كبريتيد الهيدروجين المنبعث من الفوهات.[٢] ليس هذا الغاز غنيًّا بالطاقة بطبيعته، بل إن تفاعله مع الأكسجين هو الذي ينتج الطاقة، وهذا يعتمد على منطقة «التماس» بين الفوهات والمحيطات؛ التقاء عالَمَيْن في حالة ديناميكية من عدم التوازن. وَحْدَها البكتيريا التي تعيش بجوار الفوهات مباشرة وتعتمد على كلا العالَمَيْن، وفي الوقت ذاته يمكنها القيام بهذه التفاعلات. وترعى حيوانات الفوهات نفسها على مراعي البكتيريا هذه، في حالة جمبري الفوهات، أو تربي هذه البكتيريا داخلها، كما لو أنها مزرعة داخلية. وهذا يُفَسِّر لنا لماذا، مثلًا، لا تحتاج الديدان الأنبوبية العملاقة لقناة هضمية؛ إذ إنها تتغذى من الداخل على قطعان من البكتيريا. بَيْدَ أنَّ المطلب القاسي المتمثل في ضرورة توفير كلٍّ من كبريتيد الهيدروجين والأكسجين يضع الحيوانات المضيفة أمام معضلة مثيرة للاهتمام؛ إذ إن عليها احتواء القَدْر اليسير مِنْ كلا العالَمَيْن داخلها. ويمكن تفسير السواد الأعظم من التكوين التشريحي العجيب للديدان الأنبوبية في ضوء هذه الضرورة القاهرة.

لم يستغرق الأمر وقتًا طويلًا حتى لفتت ظروفُ عالم الفوهات انتباهَ العلماء المعنيين بدراسة أصل الحياة، وأولهم عالم المحيطات جون باروس، من جامعة واشنطن بسياتل. حلَّتِ الفوهاتُ على الفور العديدَ من مشكلات الحساء، وأبرزها مشكلة الديناميكا الحرارية؛ إذ إن المداخن السوداء أبعد ما تكون عن التوازن. مع هذا، كان التفاعل بين الفوهات والمحيط مختلفًا في الأرض المبكرة؛ إذ لم يكن هناك سوى القليل من الأكسجين في ذلك الوقت، أو كان منعدمًا تمامًا. ولم تكن القوة المحركة وقتها هي التفاعل بين كبريتيد الهيدروجين والأكسجين، كما هو الحال في عملية التنفس الحديثة. على أي حال، فإن التنفس على المستوى الخلوي عملية معقدة لا بد أنها استغرقت وقتًا طويلًا كي

تتطور، ومن المستحيل أن تكون هي مصدر الطاقة البدائي. بدلًا من ذلك؛ وفقًا لجونتر فاختزهاوزر — الكيميائي الألماني المعارض دائمًا ومحامي براءات الاختراع — فإن المحرك الأوَّلي للحياة كان تفاعُلَ كبريتيد الهيدروجين مع الحديد لتكوين بيريت الحديد، وهو تفاعل يتم تلقائيًّا، ويطلق قدرًا يسيرًا من الطاقة يمكن اقتناصه، على الأقل من حيث المبدأ.

خرج فاختزهاوزر بمخطط كيميائي عن أصل الحياة لم يسبق أنْ فكَّرَ بمثله أَحَدٌ. إن الطاقة التي يُطلِقها تَكوُّن البيريت ليست كافيةً لتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى مادة عضوية؛ لذا لجأ فاختزهاوزر إلى أول أكسيد الكربون بوصفه وسيطًا أكثر تفاعلًا، وهذا الغاز بالفعل موجود في الفوهات الحمضية. وقد حفز تفاعلات أخرى بطيئة بالاستعانة بالعديد من أملاح الحديد–الكبريت المعدنية، التي بدا أن لها قوة غير عادية بوصفها عاملًا محفزًا. وتكرارًا لما حدث من قبل، تمكَّنَ فاختزهاوزر وزملاؤه من إثبات العديد من هذه التفاعلات النظرية في المختبر، وهو ما أثبت أنها أكثر من مجرد نظرية مقبولة. كان ذلك عملًا ألمعيًّا أطاح بعقود من الأفكار القديمة عن الكيفية التي ربما بدأت بها الحياة، وجعل الحياة تظهر في بيئة كالجحيم من أكثر المكونات غير المتوقعة، وتحديدًا كبريتيد الهيدروجين وأول أكسيد الكربون وبيريت الحديد؛ غازين سامين وذهب الحمقى. علَّقَ أحد العلماء، عند أول قراءة له لعمل فاختزهاوزر، قائلًا إن الأمر أشبه بالعثور مصادفةً على ورقة علمية سقطت عبر منحنى زمنيٍّ آتية من نهاية القرن الحادي والعشرين.

لكن هل فاختزهاوزر مُحِقٌّ؟ وُجِّه نَقْدٌ لاذِعٌ لفاختزهاوزر هو الآخر، وهو ما يرجع في جزء منه إلى أن تفسيره ثوريٌّ بحقٍّ، ويقلب الأفكار الأثيرة لوقت طويل رأسًا على عقب، وفي جزء آخر إلى أن أسلوبه المتعجرف يَمِيل إلى إثارة غضب زملائه العلماء، وفي جزء آخر إلى وجود مواطن شكٍّ مشروعة في الصورة التي يرسمها. ربما يُعَدُّ أبرز مواطن الضعف هو «مشكلة التركيز» التي أصابت هي الأخرى نظرية الحساء؛ فأي جزيئات عضوية يجب أن تتحلل في محيط من المياه، ومن ثَمَّ يصير من المستبعد للغاية أن يلتقي بعضها ببعض وتتفاعل لتكوين البوليمرات على غرار الآر إن إيه والدي إن إيه. لا يُوجَد شيء يحتويها. يرد فاختزهاوزر على هذا بالقول بأن كل تفاعلاته يمكن أن تقع على سطح الأملاح المعدنية مثل بيريت الحديد. بَيْدَ أن هذا أيضًا تكتنفه صعوبة معينة؛ وهي أن التفاعلات لا يمكنها أن تتم وصولًا إلى درجة الاكتمال إذا لم يَتِمَّ إطلاق المنتجات النهائية من على سطح العامل المحفز؛ فكل شيء إما يختلط ببعضه أو يتبدَّد.[٣]

اقترح مايك راسل، الذي يعمل حاليًّا في مختبر الدفع النفَّاث في باسادينا، حلًّا لكل هذه المشكلات في أواسط ثمانينيات القرن العشرين. راسل أشبه بشاعر ذي رؤية علمية تنبئية، وهو يميل إلى استخدام «اللغة الجيولوجية الشعرية»، ونظرته للحياة مبنية على مبادئ الديناميكا الحرارية والكيمياء الجيولوجية التي تبدو غامضة بالنسبة لكثير من متخصصي الكيمياء الحيوية. لكن عَبْر العقود، جذبت أفكار راسل عددًا متزايدًا من المؤيدين، الذين يرون في رؤيته حلًّا عمليًّا فريدًا لمسألة أصل الحياة.

يتفق كلٌّ من فاختزهاوزر وراسل على أن الفوهات الحرمائية تلعب دورًا محوريًّا في نشأة الحياة، لكن فيما وراء ذلك هما يختلفان أشد الاختلاف؛ فبينما يعتمد أحدهما على النشاط البركاني يعتمد الآخر على نقيضه، وبينما يُفضِّل أحدُهما الأحماضَ يُفضِّل الآخرُ القلوياتِ. والعجيب بحق أن هاتين الفكرتين المتداخلتين لا يجمع بينهما إلا القليل من الأشياء المشتركة. اسمحوا لي بتوضيح ذلك.

إن أخاديد المحيط، التي تأوي المداخن السوداء، هي مصدر القاع البحري الجديد الممتد. فمن مراكز النشاط البركاني هذه تُجْبِر الصهارةُ المرتفعةُ ببطء الصفائحَ التكتونية الملاصقة لها على التباعد؛ فتتباعد الصفائح بعضها عن بعض بسرعة تُماثِل سرعة نمو الأظافر. وبينما تتصادم هذه الصفائح المتحركة ببطء، تُجبَر إحداها على الانزلاق أسفل أخرى، بينما ترتفع الثانية في اضطراب عظيم. إن سلاسل جبال الهيمالايا والأنديز والألب كلها برزَتْ عن سطح الأرض بفعل تصادُم الصفائح التكتونية بهذه الطريقة، لكن الحركة البطيئة للقشرة الحديثة على امتداد قاع المحيط تكشف أيضًا الصخور الجديدة الآتية من طبقة الوشاح، الطبقة الموجودة أسفل القشرة الأرضية مباشرة؛ تلك الصخور تتسبب في وجود نوعٍ ثانٍ من الفوهات الحرمائية، نوع مختلف بشدة عن المداخن السوداء، وهذا النوع من الفوهات هو الذي يناصره راسل بنفسه.

النوع الثاني من الفوهات ليس بفوهات بركانية، ولا يحتوي على أي صهارة. بدلًا من ذلك هو يعتمد على تفاعل هذه الصخور المنكشفة حديثًا مع مياه البحر. إن الماء لا يكتفي بتخلل هذه الصخور وحسب، بل إنه يتفاعل معها على نحو طبيعي، ويندمج داخلها، ويُغيِّر من بنيتها لتكوين أملاح الهيدروكسيد المعدنية على غرار السربنتين المعروف بحجر الحية (الذي سُمِّي بهذا الاسم لأنه يشبه الحراشيف الخضراء المرقطة للحية). يتسبَّب تفاعل الماء مع الصخور في تشققها وتكسرها، وهو ما يسمح للمزيد من ماء البحر

بتخللها، وهكذا في عملية دائمة. إن معدل حدوث هذا التفاعل مذهل؛ إذ يُعتقَد أن حجم المياه الحبيسة داخل الصخور بهذه الصورة يعادل حجم مياه المحيطات نفسه. ومع اتساع قاع المحيط، تتمدد هذه الصخور، ويتحتم على الصخور المشبعة بالمياه أن تنزلق أسفل صفيحة تكتونية أخرى، حيث تسخن بدرجة كبيرة ثانية داخل طبقة الوشاح. وقتها تتخلى عما تحوي من مياه، مطلقة إياها في أحشاء الأرض. هذا التلوث بمياه البحر يدفع دورة الحمل الحراري إلى أعماق كبيرة داخل طبقة الوشاح، وهو ما يجبر الصهارة على الخروج إلى السطح عبر أخاديد المحيطات والبراكين. وهكذا يعود النشاط البركاني العنيف لكوكبنا في الأساس إلى التدفق المتواصل لمياه البحر عبر طبقة الوشاح. هذا ما يبقي العالم في حالة من عدم التوازن، هذا هو ما يُحرِّك كوكبنا.[٤]

لكنَّ تفاعُل مياه البحر مع الصخور الآتية من طبقة الوشاح يتسبب فيما هو أكثر من النشاط البركاني الدءوب لكوكبنا؛ فهو أيضًا يطلق الطاقة على صورة حرارة، إلى جانب كميات ضخمة من الغازات كغاز الهيدروجين. في الواقع، يُغَيِّر التفاعل شكل كل ما هو مذاب بمياه البحر كما لو كان مرآة سحرية مشوهة، تعكس صورًا منتفخة غريبة تكون فيها كل عناصر التفاعل محملة بالإلكترونات (من الناحية الفنية يُقال عنها إنها «مُختزلَة»). الغاز الأساسي المنبعث هو الهيدروجين، وهو ما يرجع إلى أن مياه البحر هي في الغالب مياه، لكن ثمة وجود لمقادير أقل من الغازات الأخرى التي تذكرنا بخليط ستانلي ميلر، والمفيدة للغاية في تكوين البنى السابقة على الجزيئات المعقدة كالبروتينات والدي إن إيه. وهكذا يتحوَّل ثاني أكسيد الكربون إلى ميثان، والنيتروجين إلى نشادر، والكبريتات إلى كبريتيد هيدروجين.

تشق الحرارة والغازات طريقها ثانية نحو السطح؛ حيث تبرز كنوعٍ ثانٍ من الفوهات الحرمائية. بَيْدَ أنَّ هذا النوع يختلف قلبًا وقالبًا عن المداخن السوداء؛ إذ إنها ليست حمضية بالمرة، بل تميل إلى القلوية الشديدة. تكون هذه الفوهات دافئة أو حارَّة، لكنها أقل حرارة بكثير من الأتون المتَّقِد للمداخن السوداء. عادةً ما تُوجَد هذه الفوهات بعيدًا قليلًا عن أخاديد منتصف المحيط؛ مصدر قاع البحر الحديث المتمدد. وبدلًا من أن تكوِّن مداخن عمودية سوداء ذات فتحة واحدة يتدفق منها الدخان الأسود، فإنها تميل إلى تكوين بنًى معقدة مليئة بالحصى الدقيقة والحجيرات، التي تترسَّب مع تخلُّل السوائل الحرمائية القلوية الدافئة مياه المحيط الباردة أعلاها. أشكُّ أن سبب عدم معرفة الناس، سوى قلة نادرة، بهذا النوع من الفوهات يرجع إلى ذلك المصطلح المنفر «التحوُّل السربنتيني»

(والمشتق من اسم معدن السربنتين). لكن تسهيلًا للأمر لنطلق عليها «الفوهات القلوية» وحسب، حتى وإن بدا هذا المسمى ركيكًا مقارنةً بمصطلح «المداخن السوداء» القوي. وسنتعرف على المغزى الكامل من استخدام كلمة «قلوية» لاحقًا.

المثير للاهتمام أنه حتى وقت قريب كان قد جرى التنبؤ بوجود الفوهات القلوية نظريًّا، لكنها لم تكن معروفة إلا من خلال قلة من الرواسب الحفرية. أشهر هذه الرواسب، في تينا بأيرلندا، عمرها ٣٥٠ مليون عام، وهي التي دفعت مايك إلى التفكير في الأمر في ثمانينيات القرن الماضي. وحين فحص قطاعًا رفيعًا من الصخور المسامية الآتية من فوهة حفرية قريبة تحت المجهر الإلكتروني، وجد أن الحجيرات الرفيعة كانت مشابهة في الحجم للخلايا العضوية؛ إذ كان قطرها يبلغ عُشر المليمتر أو أقل، وأنها كانت متصلة بعضها ببعض عَبْر مجموعة من الشبكات المتداخلة. وقد خمن أنه بالإمكان تكوُّن خلايا معدنية مشابهة عندما اختلطت سوائل الفوهات القلوية بمياه المحيط الحمضية، وسريعًا ما نجح في إنتاج بنًى صخرية مسامية عن طريق خلط القلويات بالأحماض. وفي خطاب نُشِر بمجلة «نيتشر» في عام ١٩٨٨ ذكر راسل أن ظروف الفوهات القلوية تجعل منها مهد الحياة المثالي. وفَّرَت الحجيراتُ وسيلةً طبيعيةً لتركيز الجزيئات العضوية، بينما أمدَّت الجدران، المكوَّنة من أملاح الحديد-الكبريت المعدنية على غرار «الماكيناوايت»، هذه الخلايا المعدنية بالخصائص المحفزة التي تصورها جونتر فاختزهاوزر. وفي ورقة بحثية نُشِرَتْ عام ١٩٩٤ اقترح راسل وزملاؤه أن:

> الحياة نشأَتْ من المجموع المتنامي لفقاعات كبريتيد الحديد التي تحتوي على محلول قلويٍّ حرمائيٍّ شديد الاختزال. تضخمت هذه الفقاعات هيدروستاتيكيًّا في ينابيع الكبريت الساخنة الواقعة تحت مياه المحيط على مبعدة من المراكز المحيطية المتمددة منذ ٤ مليارات عام مَضَتْ.

كانت كلماتهم تنبئية؛ لأنه في ذلك الوقت لم يكن نظام الحياة داخل الفوهات القلوية الموجودة في الأعماق قد اكتُشِف بَعْدُ. بعد ذلك، في مطلع الألفية الجديدة، عثر العلماء على متن الغواصة أطلنطس على هذا النوع من الفوهات عَيْنِه، وذلك على بعد نحو خمسة عشر كيلومترًا من أخدود وسط الأطلسي، على جبل مغمور تحت الماء تصادف أنه يُسمَّى «مسيف أطلنطس». سُمِّي الموقع في النهاية باسم «المدينة المفقودة»، على غرار قارة أطلنطس المفقودة، وجعلت أعمدةُ الكربونات البيضاء المرتفعة قبالة السواد الحالك

للأعماق وأصابعُها هذا المسمَّى ملائمًا على نحو عجيب. لم يكن حقل الفوهات يبدو مثل أي شيء جرى اكتشافه من قبل. بعض الفوهات كانت في نفس ارتفاع المداخن السوداء، وأكبرها حجمًا — التي تحمل اسم بوسايدون — وصل ارتفاعها إلى ستين مترًا. بَيْدَ أنَّ هذه الفوهات لم تكن بالبنى القوية الراسخة، بل كانت هذه الأصابع الهشة مزخرفة كالعمارة القوطية، ومليئة بـ «الرسوم المفرغة» حسب كلمات جون جوليوس نوريتش. هنا، كانت انبعاثات الفوهات الحرمائية عديمة اللون، معطيةً الانطباع بأن المدينة هُجرت على نحو مفاجئ، وحُفظت طوال كل هذا الوقت ببهائها القوطي المعقد. لا وجود لمداخن سوداء قبيحة، بل فوهات بيضاء هشة، تشير هياكلها المتحجرة نحو السماء (انظر الشكل ١-٢).

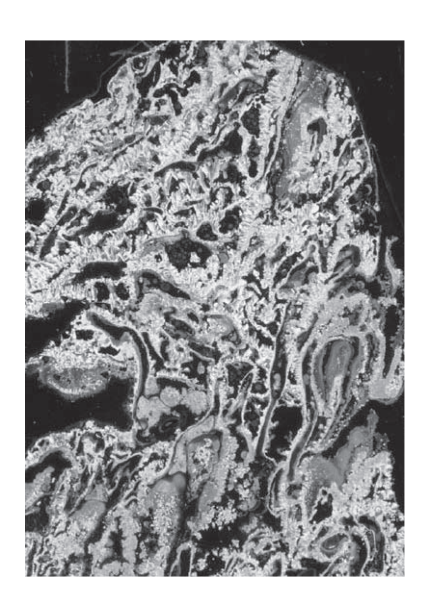
قد تكون هذه الانبعاثاتُ غيرَ مرئية، بَيْدَ أنها حقيقة لا مراء فيها، وهي قادرة على استضافة مدينة حية. لا تتألف هذه الفوهات من أملاح الحديد-الكبريت المعدنية (نادرًا ما يذوب الحديد في مياه المحيط الغنية بالأكسجين، وتنبؤات راسل متصلة بحقب زمنية شديدة القِدَم)، لكن لا تزال بنيتها مسامية، متاهة من الحجيرات المجهرية ذات جدران من الأراجونيت الهش (انظر الشكل ١-٣). ومن العجيب أن البنى القديمة التي صمتت ولم تَعُدْ تَفُور بالسوائل الحرمائية أكثر صلابة بمراحل؛ إذ تمتلئ مسامها بالكالسيت. على النقيض، تعج الفوهات الحية بالحياة؛ إذ تمتلئ مسامها بالنشاط البكتيري الصاخب الذي يتجلَّى فيه عدم التوازن الكيميائي في أوضح صُوَره. تُوجَد هناك أيضًا حيوانات، تُماثِل في تنوُّعها تلك الموجودةَ حول المداخن السوداء، وإن كانت تَقِلُّ عنها كثيرًا من حيث الحجم. يبدو أن سبب ذلك يتعلق بالبيئة؛ فبكتيريا الكبريت التي تعيش في المداخن السوداء تتكيف بسرعة مع الحياة داخل عوائلها من الحيوانات، بينما البكتيريا (أو تحديدًا العتائق) التي عُثِرَ عليها في المدينة المفقودة لا تدخل في مثل هذا النوع من الشراكة.[٥] وفي ظل انعدام «المزارع» الداخلية، تنمو حيوانات الفوهات بشكل أقل كفاءة.

الحياة في المدينة المفقودة مبنية على تفاعل الهيدروجين مع ثاني أكسيد الكربون، الذي هو في الحقيقة أساس الحياة كلها على كوكبنا. ففي المدينة المفقودة، وعلى نحوٍ غير معتاد، يتم التفاعل على نحو مباشر، بينما في كل الحالات الأخرى يتم على نحو غير مباشر؛ فالهيدروجين الخام، المنبعث من الأرض على صورة غاز، هدية نادرة الوجود على كوكبنا، وعادة ما تكون الحياة مجبرة على البحث عن إمدادات خفية من ذرات هذا الغاز تكون مرتبطة في روابط جزيئية مُحكَمة بذرات أخرى؛ مثل الماء أو كبريتيد الهيدروجين.



شكل ١-٢: فوهة قلوية نشطة ارتفاعها ٣٠ مترًا، تُعرَف باسم «نيتشر تاور»، موجودة في حقل «المدينة المفقودة»، وتنبجس من القاعدة الصخرية السربنتينية. المناطق النشطة تظهر بالأبيض الساطع. العلامة تساوي ارتفاعًا قَدْرُه متر واحد.

ونزع الهيدروجين من مثل هذه الجزيئات وربطه بثاني أكسيد الكربون يستهلك طاقة، طاقة تأتي في النهاية من الشمس على صورة بناءٍ ضوئيٍّ، أو من خلل التوازن الكيميائي في عالم الفوهات. فقط في حالة غاز الهيدروجين نفسه يحدث التفاعل على نحوٍ تلقائيٍّ، وإن كان بطيئًا للغاية. لكن من المنظور الديناميكي الحراري، هذا التفاعل بمنزلة غذاء مجاني يُدفَع لك مقابل تناوله (حسب تعبير إيفريت شوك البارز). بعبارة أخرى، يُولِّد التفاعلُ جزيئاتٍ عضويةً على نحوٍ غير مباشر، ويُطلِق على الفور كميةً غنيةً من الطاقة يمكن استخدامها، نظريًّا، في دعم التفاعلات العضوية الأخرى.



شكل ١-٣: بنية مجهرية لإحدى الفوهات القلوية تظهر بها الحجيرات المتداخلة التي توفر ملاذًا مثاليًّا لمنشأ الحياة. المقطع المبين يبلغ عرضه نحو سنتيمتر واحد وسُمْكه نحو ٣٠ ميكرونًا.

هكذا تستوفي فوهات راسل المقومات الضرورية لمنشأ الحياة؛ فهي جزء لا يتجزَّأ من نظام يقلب سطح الكرة الأرضية رأسًا على عقب، ويعزز النشاط البركاني المتواصل للكوكب. وهي تفتقر على نحوٍ متواصلٍ للتوازن مع المحيطات، وتنفث مخزونًا ثابتًا من الهيدروجين الذي يتفاعل مع ثاني أكسيد الكربون لتكوين الجزيئات العضوية. وهي تكوِّن متاهة من الحجيرات المسامية التي تحتفظ بأي جزيئات عضوية تتكون وتركزها، وهو ما يجعل عملية تجميع البوليمرات، كالآر إن إيه، أمرًا مرجحًا بشدة (كما سنرى في الفصل التالي). وهي طويلة العمر؛ ففوهات المدينة المفقودة تعمل منذ أربعين ألف عام، أي تبلغ من العمر ضعفَيْ عُمُر أغلب المداخن السوداء. كما أنها كانت وفيرة العدد في الأرض المبكرة، حين كانت طبقة الوشاح التي تَفْقِد حرارتها تتلامس بشكل مباشر مع المحيطات. في تلك الأيام أيضًا كانت المحيطات مُحَمَّلة بالحديد الذائب، وكانت

الحجيرات المجهرية تملك جدرانًا محفِّزة مُكَوَّنة من أملاح الحديد–الكبريت المعدنية، على غرار حفريات الفوهات الموجودة في تينا بأيرلندا. في واقع الأمر كانت هذه الفوهات تعمل كمفاعلات تدفق طبيعية؛ حيث تعمل التدريجات الحرارية والكهروكيميائية على تدوير السوائل المتفاعلة عَبْر الحجيرات المحفِّزة.

كل هذا لا بأس به، لكن من النادر أن يتمكَّن مفاعل وحيد، مهما كان ذا قيمة، من أن يؤلف الحياة بأسرها. كيف تقدمت الحياة من مثل هذه المفاعلات الطبيعية إلى ذلك النسيج المعقد البديع من الابتكار والبراعة الذي يحيط بنا؟ الإجابة — بالطبع — مجهولة، لكن ثمة دلائل تأتينا من خصائص الحياة نفسها، وعلى الأخص من لُبٍّ داخليٍّ من التفاعلات المحفوظة بعمق تتشاركه كل أشكال الحياة على الأرض اليوم. لب الأيض هذا، الحفرية الداخلية الحية، يحتفظ بأصداء آتية من الماضي البعيد، أصداء تتناغم مع الأصول البدائية للحياة داخل الفوهات الحرمائية القلوية.

ثمة سبيلان لدراسة أصل الحياة: «من الأسفل إلى الأعلى» و«من الأعلى إلى الأسفل». حتى الآن في هذا الفصل تناولنا أصل الحياة «من الأسفل إلى الأعلى»؛ إذ تدبرنا الظروف الجيوكيميائية وتدرجات الديناميكا الحرارية التي من المرجح أنها وُجِدَتْ في الأرض المبكرة. وقد توصَّلْنا إلى أن الفوهات الحرمائية الدافئة الموجودة في أعماق المحيطات، والتي تغلي بفقاعات الهيدروجين وتنفثه في مياه المحيط المشبعة بثاني أكسيد الكربون، هي أكثر البيئات ترجيحًا لظهور الحياة. كان من شأن هذه المفاعلات الكهروكيميائية الطبيعية أن تستطيع توليد كلٍّ من الجزيئات العضوية والطاقة، لكننا لم نتدبر بَعْدُ أي التفاعلات تحديدًا وقعت، أو كيف أدت إلى الحياة التي نعرفها.

الدليل الوحيد الحقيقي لمعرفة ما صارت عليه الحياة هو الحياة كما نعرفها اليوم، بمعنى دراسة أصل الحياة «من الأعلى إلى الأسفل». يمكننا تصنيف كل السمات التي تتقاسمها الكائنات الحية كي نعيد بناء السمات الافتراضية التي اتَّصَفَ بها «آخر سلف مشترك عام». وهكذا، مثلًا، يمكن أن نستنتج من حقيقة أن مجموعة فرعية صغيرة فقط من البكتيريا قادرة على القيام بالبناء الضوئي أنه من غير المرجح أن يكون هذا السلف المشترك نفسه قد اتسم بهذه السمة. فلو كان كذلك لتعيَّنَ على قطاع كبير من ذريته أن يتخلَّى عن مهارة قيمة، وهو ما يبدو أمرًا بعيد الاحتمال وإن تعذَّرَ إقصاؤه كلية على نحوٍ مؤكَّد. وعلى العكس، تتقاسم كل أشكال الحياة على الأرض سمات مشتركة: فكل الكائنات

الحية مكونة من خلايا (خلا الفيروسات، التي يمكنها العمل فقط داخل الخلايا)، وكلها تملك جينات مكونة من الدي إن إيه، وكلها تشفر البروتينات بواسطة شفرة عامة من أجل تكوين أحماض أمينية بعينها. كل الكائنات الحية تتشارك في عملة طاقة واحدة، تُعرَف بثلاثي فوسفات الأدينوسين الذي يعمل على نحوٍ أشبه بالورقة النقدية فئة عشرة جنيهات استرلينية، بحيث يمكنه أن «يسدد ثمن» كل أنواع العمل الخاص بالخلية (المزيد عن هذا لاحقًا). وهكذا يمكننا أن نستنتج منطقيًّا أن كل الكائنات الحية ورثت سماتها المشتركة من ذلك السلف البعيد المشترك.

كل أشكال الحياة اليوم تتقاسم أيضًا جوهرًا مشتركًا من تفاعلات الأيض، التي تقبع في قلبها دورة صغيرة من التفاعلات معروفة باسم دورة حمض الستريك، أو دورة كربس على اسم السير هانز كربس، العالم الألماني الحائز جائزة نوبل وأول مَنْ فَسَّرَ عمل الدورة في شيفيلد في ثلاثينيات القرن العشرين، بعد أن فَرَّ من النازيين. لدورة كربس مكانة جليلة في الكيمياء الحيوية، لكن لأجيال من الدارسين بَدَتْ هذه الدورة كأسوأ نوع من التاريخ العتيق المبهم؛ فكانوا يستظهرونها دون فهم في أوقات الاختبارات ثم ينسونها بعد ذلك.

لكِنْ ثمة شيء مميز في دورة كربس؛ فعلى جدران حجرات أقسام الكيمياء الحيوية التي يعوزها التنظيم — تلك الحجرات التي تجد فيها أكوامًا من الكتب والأوراق مكدَّسة على المكاتب وتكاد تقع على الأرض وعلى سلة المهملات التي لم تُفرَغ منذ سنوات — عادة ما ستجد رسمًا تخطيطيًّا باهتًا مجعدًا باليًا لعملية الأيض، وحين تنظر إلى مثل هذه المخططات بمزيد من الانبهار والرعب أثناء انتظارك عودة أستاذك، ستجد أنها ذات درجة تعقيد صادمة، وكأنها خريطة وضعها مجنون لمترو الأنفاق؛ فهي مليئة بالأسهم الصغيرة التي تشير في كل اتجاه، ويلتف بعضها حول بعض. ومع أنها باهتة، فإنك ستتبيَّن أن هذه الأسهم كلها تحمل ألوانًا رمزيةً تشير إلى مسارات مختلفة، حيث البروتينات باللون الأحمر والشحوم بالأخضر وهكذا. قرب الجزء السفلي للمخطط ستجد دائرة ضيقة صغيرة تعطي الانطباع بأنها مركز ثورة الأسهم تلك، ربما تكون هي الدائرة الوحيدة على الخريطة كلها، وهي بالتأكيد الجزء الوحيد المرتب فيها. هذه هي دورة كربس. وبينما تنظر إليها مجددًا ستبدأ في إدراك أن كل الأسهم الملوَّنة على المخطط تخرج من دورة كربس، وكأنها برامق عجلة مشوهة. إنها مركز كل شيء، جوهر عملية الأيض بالخلية.

لم تَعُدْ دورة كربس مبهمة الآن. فقد بيَّنَتْ أَحْدَثُ الأبحاث الطبية أنها تقع في قلب جميع العمليات البيولوجية للخلية إلى جانب عملياتها الكيميائية أيضًا. ومن شأن التغير

في سرعة دوران هذه الدائرة التأثير على كل شيء من الشيخوخة إلى السرطان إلى حالة الطاقة. لكن ما مَثَّلَ مفاجأةً أكبرَ هو أن دورة كربس يمكنها الدوران إلى الخلف. في المعتاد تستهلك الدورة الجزيئات العضوية (من الغذاء) وتطلق الهيدروجين (المُقدَّر له أن يحترق برفقة الأكسجين في عملية التنفس) وثاني أكسيد الكربون. وبهذا لا توفر الدورة المتطلبات الأساسية للمسارات الأيضية وحسب، بل إنها تنتج أيضًا حزمًا صغيرة من الهيدروجين المطلوب من أجل توليد الطاقة كثلاثي فوسفات الأدينوسين. حين تسير الدورة على نحوٍ معاكس ينقلب الأمر؛ إذ تمتصُّ ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين كي تكوِّن نوعًا جديدًا من الجزيئات العضوية، وكلها الوحدات البنائية الأساسية للحياة. لكن بدلًا من إطلاق الطاقة مع دورانها، تستهلك الدورة العكسية ثلاثي فوسفات الأدينوسين. فإذا وفرت لها ثلاثي فوسفات الأدينوسين وثاني أكسيد الكربون والهيدروجين، تخرج الدورة الوحدات البنائية الأساسية للحياة، كما لو كان بفعل السحر.

هذا الدوران المعاكس لدورة كربس ليس شائعًا حتى في البكتيريا، لكنه شائع نسبيًّا في البكتيريا التي تعيش في الفوهات الحرمائية. إنها وسيلة مهمة، وإن كانت بدائية، لتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى الوحدات البنائية للحياة. وقد عكف الكيميائي الحيوي البارز بجامعة ييل هارولد موروفيتس، الذي يعمل حاليًّا بمعهد كراسنو للدراسات المتقدمة بفيرفاكس، فيرجينيا، على رصد خصائص دورة كربس العكسية عدة سنوات. وبصورة عامة تقضي النتيجة التي توصَّلَ إليها بأنه في ظل تركيزات كافية من كل المكونات، ستدور الدورة من تلقاء نفسها. إنها عملية كيميائية بسيطة: إذا زاد تركيز أي وسيط؛ فسيميل إلى التحول إلى الوسيط التالي بالتبعية. والجزيئات العضوية الموجودة بدورة كربس هي أكثر الجزيئات العضوية المكنة ثباتًا؛ ومن ثم هي الأكثر ترجيحًا في التكوُّن. بعبارة أخرى، لم «تُخترع» دورة كربس بواسطة الجينات، بل هي مسألة كيمياء احتمالات وديناميكا حرارية. وحين تطورت الجينات، لاحقًا، أدارت هذه العملية الكيميائية التي كانت موجودة بالفعل، تمامًا مثلما يكون مايسترو الفرقة الموسيقية مسئولًا عن عملية تفسير القطعة الموسيقية — من حيث سرعة الإيقاع والوقفات الفرعية — لكن ليس الموسيقى نفسها. فالموسيقى موجودة طوال الوقت؛ موسيقى كونية.

بمجرد البدء في دورة كربس وتزويدها بمصدر للطاقة، تصير التفاعلات الجانبية أمرًا محتومًا، وتؤدي إلى ظهور متطلبات الحياة الأكثر تعقيدًا على غرار الأحماض الأمينية والنيوكليوتيدات. إن مسألة تحديد أي مقدار من عملية الأيض الجوهرية للحياة على

الأرض جاء بصورة طبيعية، وأي مقدار أتى لاحقًا نتاجًا للجينات والبروتينات قضيةٌ مثيرةٌ للاهتمام، بَيْدَ أنَّها خارج نطاق كتابنا هذا، لكني أود أن أوضح نقطة عامة؛ وهي أن الغالبية العظمى من محاولات تخليق وحدات الحياة البنائية كانت تقليدية أكثر مما ينبغي. فهي تبدأ بجزيئات بسيطة كالسيانيد، التي ليس لها أدنى علاقة بكيمياء الحياة كما نعرفها (في الواقع هي بمنزلة اللعنة لها)، ثم تَعْمد إلى تخليق وحدات الحياة البنائية من خلال معالجة عوامل مثل الضغط أو درجة الحرارة أو التفريغ الكهربي، وهي عوامل جميعها غير بيولوجية بالمرة. لكن ماذا سيحدث حين تبدأ بجزيئات لدورة كربس وبعض ثلاثي فوسفات الأدينوسين في الأحوال المثالية داخل مفاعل كهروكيميائي كالذي اقترحه مايك راسل؟ كم عدد المخططات الأيضية البالية التي تظهر على نحوٍ تلقائيٍّ من هذه المكونات فيما يشبه تجسيدًا أثيريًّا يمتلئ تدريجيًّا من الأسفل بأكثر الجزيئات ترجيحًا من منظور الديناميكا الحرارية؟ لست الوحيد الذي يشك في ظهور العديد منها، ربما وصولًا لمستوى البروتينات (وتحديدًا عديدات الببتيد) والآر إن إيه، وعند هذه النقطة يبدأ الانتقاء الطبيعي في تولِّي الأمر برمته.

كل هذا خاضع للتجريب، وأغلب هذه التجارب لم يتم حتى الآن. ولكي يكون أيٌّ من هذا واقعيًّا؛ سنحتاج لعملية إنتاج أنيقة ثابتة لذلك المكوِّن السحري، ثلاثي فوسفات الأدينوسين. وفي هذا الصدد ربما تشعر أننا نستبق الأمور قليلًا؛ إذ نحاول الجري قبل أن نتعلم المشي. كيف يمكننا توليد ثلاثي فوسفات الأدينوسين؟ الإجابة الأكثر إقناعًا في نظري تأتي من بيل مارتن، الكيميائي الحيوي الأمريكي اللامع والصريح دائمًا، الذي هجر الولايات المتحدة للعمل في وظيفة أستاذ لعلم النبات في جامعة دوسلدورف. ومن هنا، كان مارتن مصدرًا لدفق ثابت من الأفكار المخالفة للسائد بشأن أصل كل شيء تقريبًا له أهمية في علم الأحياء. قد تكون بعضُ هذه الأفكار خاطئةً، لكنها دائمًا ما تكون شيقة وغالبًا ما تجعل المرء يرى البيولوجيا من منظور مختلف. منذ بضع سنوات جلس مارتن مع مايك راسل، وتدارس الاثنان عملية الانتقال من الكيمياء الجيولوجية إلى الكيمياء الحيوية، ومنذ ذلك الوقت والأفكار تتدفق في حرية. لِنُلْقِ نظرةً على هذه الأفكار.

عاد مارتن وراسل إلى الأساسيات؛ تدفُّق الكربون إلى العالم العضوي. فقد ذَكَرا أنه تُوجَد اليوم خمسة سبل أيضية فقط يمكن بها للنباتات والبكتيريا أن تُدْخِل الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون إلى عوالمها الحية؛ من أجل توليد المادة العضوية، وأحد هذه السُّبُل

هو دورة كربس العكسية كما رأينا. أربعة من السبل الخمسة تستهلك ثلاثي فوسفات الأدينوسين (مثلما تفعل دورة كربس)؛ وبهذا لا يمكن أن تحدث إلا في وجود مدخل من الطاقة. لكن السبيل الخامس، التفاعل المباشر للهيدروجين مع ثاني أكسيد الكربون، لا يُنْتِج جزيئات عضوية وحسب، بل ويُطْلِق طاقة أيضًا. ثمة مجموعتان من الكائنات القديمة تفعل هذا تحديدًا، عن طريق سلسلة من الخطوات المشابهة بصورة عامة. قابلنا بالفعل إحدى هاتين المجموعتين؛ العتائق التي تعيش في حقل فوهات المدينة المفقودة.

إذا صحَّ رأي مارتن وراسل، فإن الأسلاف البعيدة لهذه العتائق كانت تؤدي مجموعة التفاعلات نفسها في بيئة مطابقة تقريبًا، وذلك منذ ٤ مليارات عام، أي في فجر الحياة. لكن تفاعل الهيدروجين مع ثاني أكسيد الكربون ليس مباشرًا كما يبدو؛ لأن الجزيئين لا يتفاعلان على نحو تلقائي. إنهما «خجولان» إلى حدٍّ ما، ويحتاجان إلى عامل مساعد يقنعهما بالتفاعل، كما أنهما يحتاجان مدخلًا صغيرًا من الطاقة لبدء التفاعل. وعندئذٍ فقط يتَّحِد الجزيئان، ويطلقان المزيد من الطاقة مع اتحادهما. العامل المساعد بسيطٌ للغاية؛ فالإنزيمات التي تحفز على التفاعل اليوم تحوي عناقيد صغيرة من الحديد والنيكل والكبريت في ألبابها لها تركيب مشابه للغاية لتركيب الأملاح المعدنية الموجودة في الفوهات. يُرجِّح هذا أن الخلايا البدائية ضمَّتْ عاملًا مساعدًا جاهزًا بالفعل، وهو الملمح الذي يشير إلى قِدَم هذا السبيل؛ إذ إنه لا يتطلب تطوير بروتينات مُعقَّدة. وكما يُعَبِّر مارتن وراسل عن الأمر فإن لهذا السبيل جذورًا صخرية.

اتَّضَح أن مصدر الطاقة الذي كان مطلوبًا لإتمام التفاعل، على الأقل في عالم الفوهات، هو الفوهات نفسها. فقد أفصح ناتج غير متوقع للتفاعل عن تأثيرها؛ نوع مشع من الخل يُعرَف باسم «أسيتيل ثيوإستر».[٦] تتكون جزيئات الأسيتيل ثيوإستر؛ لأن ثاني أكسيد الكربون ثابت إلى حدٍّ ما ويقاوم هجوم الهيدروجين، لكنه ضعيف حيال شظايا «الجذور الحرة» للكربون أو الكبريت الموجود بالفوهات والأكثر تفاعلًا. نتيجة لذلك، تأتي الطاقة المطلوبة لإقناع ثاني أكسيد الكربون بالتفاعل مع الهيدروجين من الفوهات نفسها على صورة جذور حرة متفاعلة، وهذه هي التي تنتج جزيئات الأسيتيل ثيوإستر.

لجزيئات الأسيتيل ثيوإستر أهمية كبيرة لأنها تُوجَد في نقطة تفرع قديمة في عملية الأيض، والتي لا تزال موجودة في كائنات اليوم. فحين يتفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الأسيتيل ثيوإستر نكون بهذا على طريق تكوُّن الجزيئات العضوية الأكثر تعقيدًا. يحدث التفاعل على نحوٍ تلقائيٍّ ويطلق طاقة؛ كي ينتج جزيئًا ذا ثلاث ذرات من الكربون يُسمَّى

البيروفات؛ وهو الاسم الذي من شأنه أن يثير اهتمام الكيميائيين الحيويين؛ لأنه أحد نقاط الدخول إلى دورة كربس. بعبارة أخرى، ينقلنا عدد قليل من التفاعلات — كلها مواتية من المنظور الديناميكي الحراري، وعدد منها يُحفَّز بواسطة إنزيمات ذات عناقيد أشبه بالأملاح المعدنية في ألبابها، ما يمنحها «جذورًا صخرية» — مباشرة إلى القلب الأيضي للحياة؛ دورة كربس، دون أي جلبة إضافية. وبمجرد الدخول إلى دورة كربس، كل ما ستحتاج إليه هو إمداد ثابت من ثلاثي فوسفات الأدينوسين لبدء عملها، من أجل توليد الوحدات البنائية للحياة.

الطاقة تحديدًا هي ما ينتج عن الطرف الآخر لهذا التفاعل، حين يتفاعل الفوسفات مع جزيء أسيتيل ثيوإستر آخر. يجب الإقرار بأن هذا التفاعل لا ينتج ثلاثي فوسفات الأدينوسين، بل صورة أبسط منه تُسمَّى أسيتيل الفوسفات. ومع هذا يؤدي الناتج نفس الغرض ويُستخدَم هو الآخر إلى جوار ثلاثي فوسفات الأدينوسين من جانب بعض أنواع البكتيريا اليوم. وهو يفعل نفس ما يفعله ثلاثي فوسفات الأدينوسين؛ إذ ينقل مجموعة الفوسفات المتفاعلة الخاصة به إلى جزيئات أخرى، مانحًا إياها دفعة الطاقة التي تنشطها بدورها. هذه العملية تشبه لعبة المطاردة التي يلعبها الأطفال، والتي فيها يتعيَّن على الطفل «المطارِد» أن يلمس طفلًا آخر حتى يصير الطفل الثاني هو «المطارِد» بدلًا منه. وعلى الطفل «المطارِد» أن ينشط كي ينقل الدور إلى طفل آخر غيره. تتم عملية نقل الفوسفات من جزيء إلى آخر بالطريقة عينها تقريبًا؛ إذ تنشِّط عملية النقل الجزيء المتلقي الذي لولاها لظل خاملًا. هذه هي الصورة التي يستطيع بها ثلاثي فوسفات الأدينوسين تحريك دورة كربس بشكل عكسي، ويفعل أسيتيل فوسفات الأمر عينه. وبمجرد نقل الفوسفات النشط، يتبقى لدينا الخل؛ وهو منتج شائع للبكتيريا اليوم. في المرة التالية التي تفتح فيها زجاجة نبيذ فاسد (أي تحوَّلَ النبيذ بها إلى خل) فكِّر قليلًا في البكتيريا التي تعمل داخل الزجاجة، وتولد منتجًا مهملًا قديمًا قِدَم الحياة ذاتها، لكن هذا المنتج المهمل أعلى مكانة من أفخر أنواع النبيذ.

بوضع كل هذا معًا، تعمل الفوهات الحرمائية القلوية على توليد جزيئات أسيتيل ثيوإستر على نحوٍ متواصل، وتوفر كلًّا من نقطة بدء تكوُّن الجزيئات العضوية الأكثر تعقيدًا والطاقة المطلوبة لتصنيعها، وذلك في صيغة مماثلة في جوهرها لتلك المستخدمة في الخلايا اليوم. توفر خلايا الأملاح المعدنية التي تتخلل الفوهات في الوقت عينه وسيلة لتركيز المنتجات، وتعزيز هذه التفاعلات، وكعامل مساعد لتسريع العملية، وذلك دون

احتياج لأي بروتينات معقدة في هذه المرحلة. وأخيرًا، يعني انبعاث الهيدروجين وغيره من الغازات الأخرى داخل متاهة خلايا الأملاح المعدنية أن كل المواد الخام تتجدد على نحوٍ متواصل وتختلط على نحوٍ تام. إنها ينبوع الحياة بحق، خلا تفصيلة واحدة تافهة لها تبعات عميقة للغاية.

تتعلق المشكلة بدفعة الطاقة الصغيرة المطلوبة مقدمًا لتدفئة العلاقات بين الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون. ذكرت أن هذه ليست مشكلة في الفوهات نفسها؛ لأن الظروف الحرمائية تعمل على تكوين جذور حرة متفاعلة تبدأ العملية، بَيْدَ أنَّها مشكلة حقيقية للخلايا المستقلة التي لا تعيش داخل الفوهات؛ فهي تحتاج عوضًا عن ذلك إلى استهلاك ثلاثي فوسفات الأدينوسين لبدء التفاعل، ما يشبه شراء المشروب من أجل إذابة الجمود في الموعد الغرامي الأول. ما مشكلة ذلك الأمر؟ المشكلة حسابية بالأساس؛ فتفاعل الهيدروجين مع ثاني أكسيد الكربون يُطلِق طاقةً تكفي لتوليد جزيء واحد من ثلاثي فوسفات الأدينوسين. لكنك إذا استهلكت جزيئًا واحدًا من ثلاثي فوسفات الأدينوسين لتوليد جزيء واحد من ثلاثي فوسفات الأدينوسين، فلن يصير لديك مكسب صافٍ. وإذا لم يكن لديك أي مكسب صافٍ فلن تستطيع بدء دورة كربس، ولن تنتج أي جزيئات عضوية معقدة. قد تستطيع الحياة الاستمرار داخل الفوهات، لكن سيُكتَب عليها الارتباط بالفوهات إلى الأبد بواسطة حبل سُرِّي ديناميكي حراري لا يمكن قطعه مطلقًا.

من الواضح أن الحياة ليست مقصورة على الفوهات. إذا لم يكن كل هذا تصورًا زائفًا بالكامل، فما المخرج؟ كانت الإجابة التي اقترحها مارتن وراسل مدهشةً؛ لأنها تُفَسِّر لنا لماذا تستفيد الحياة اليوم من وسيلة تنفُّس غريبة بالكامل لتوليد الطاقة، ربما تُعَدُّ أكثر آلية محيرة منافية للمنطق في علم الأحياء بأسره.

في رواية «دليل المسافر إلى المجرة» يهبط أسلاف البشر المعاصرين الحمقى بالكامل على كوكب الأرض ويحلون محل الرجال القرود. بعد ذلك يشكلون لجنة فرعية لإعادة اختراع العجلة ويعتمدون أوراق الأشجار عُملاتٍ قانونية، وهو ما يجعل الجميع أثرياء ثراء فاحشًا. بَيْدَ أنهم يصادفون مشكلة عويصة مع التضخم؛ إذ باتت حمولة سفينة واحدة من الفول السوداني تعادل أوراق ثلاث غابات متساقطة الأوراق. من ثم؛ عمد أسلافنا إلى برنامج ضخم لتقليل التضخم وحرقوا جميع الغابات. كل هذا يبدو مقبولًا، وإن كان على نحوٍ بغيض.

إذا تجاوزنا العبث الذي يتسم به الأمر برمته، فسنجد أنه يثير نقطةً جادَّةً بشأن طبيعة العُمْلة النقدية؛ وهي أنه لا يُوجَد إطلاقًا ما يثبِّت القيمة. يمكن أن تساوي حبة الفول السوداني قيمة سبيكة ذهبية، أو مليم واحد، أو ثلاث غابات متساقطة الأوراق؛ كل هذا يعتمد على التقييم النسبي والندرة وغيرها من العوامل. ويمكن للورقة النقدية فئة عشرة جنيهات استرلينية أن تساوي أي قيمة، لكن ليس هذا هو الحال في الكيمياء. منذ قليل، شبهت ثلاثي فوسفات الأدينوسين بالورقة النقدية فئة عشرة جنيهات، وكنت حريصًا عند انتقائي هذه القيمة. إن روابط الطاقة داخل ثلاثي فوسفات الأدينوسين تُحتِّم عليك إنفاق عشرة جنيهات حتى يتم تصنيع جزيء واحد من ثلاثي فوسفات الأدينوسين، على أن تتلقى عشرة جنيهات بالضبط حين تنفق هذا الجزيء. ليست القيمة نسبية مثلما هو الحال مع العملة النقدية البشرية، وهذا هو أساس المشكلة التي تواجهها أي بكتيريا تحاول الخروج من الفوهات. ليس ثلاثي فوسفات الأدينوسين بالعملة العالمية مثل الورقة النقدية فئة عشرة جنيهات استرلينية؛ فهو غير مَرِن في قيمته، ولا يمكن تقسيمه إلى وحدات أصغر، أو فكَّة. فإذا أردت شراء مشروب رخيص من أجل إذابة الجمود في الموعد الغرامي الأول، فعليك دفع الورقة النقدية فئة عشرة جنيهات، وحتى إن كان المشروب يتكلَّف جنيهين فقط فلن تحصل على المبلغ المتبقي؛ إذ لا يُوجَد ما يُسمَّى بخُمس جزيء ثلاثي فوسفات الأدينوسين. وحين تقتنص الطاقة التي يطلقها تفاعُل الهيدروجين مع ثاني أكسيد الكربون، يمكنك فقط استعادتها على صورة عملات نقدية فئة عشرة جنيهات. لِنَقُلْ إنك تستطيع، نظريًّا، أن تكسب ثمانية عشر جنيهًا من التفاعل، لن يكون هذا كافيًا لتصنيع جزيئين من ثلاثي فوسفات الأدينوسين؛ لذا ستكتفي بتصنيع جزيء واحد فقط. ستخسر ثمانية جنيهات؛ لأنه لا يمكن تقسيم الجزيء إلى وحدات أصغر. أغلبنا يواجه هذه المشكلة مع مكاتب الصرافة التي لا تتعامل إلا بالمبالغ الكبيرة.

إجمالًا، إذن، بالرغم من الحاجة إلى إنفاق جنيهين استرلينيين لبدء التفاعل، مع الحصول على عائد قَدْره ثمانية عشر جنيهًا، فإننا حين نكون مجبرين على استخدام ورقتنا النقدية العالمية فئة عشرة جنيهات سيتعيَّن علينا أن ننفق عشرة جنيهات للحصول على عشرة جنيهات. لا تستطيع البكتيريا تجنُّبَ هذه المعادلة؛ فليس بوسع أيٍّ منها النمو بواسطة التفاعل المباشر للهيدروجين مع ثاني أكسيد الكربون باستخدام ثلاثي فوسفات الأدينوسين وحده. لكنها تنمو بالفعل، من خلال طريقة عبقرية تحوِّل بها ورقة عشرة جنيهات إلى وحدات أصغر؛ طريقة لها اسم مهيب هو «التناضح الكيميائي»، والتي عادت

على أول من كشف عنها — عالم الكيمياء الحيوية البريطاني غريب الأطوار بيتر ميتشيل — بجائزة نوبل عام ١٩٧٨. أنهت الجائزةُ عقودًا من الخلافات المريرة. لكن اليوم، من منظور الألفية الجديدة، يمكننا أن نرى أن اكتشاف ميتشيل يُعَدُّ من أعظم اكتشافات القرن العشرين.[٧] لكن حتى تلك القِلَّة من الباحثِين الذين أيَّدوا أهمية التناضح الكيميائي يجدون صعوبة في تفسير سبب شيوع مثل هذه الآلية الغريبة في الحياة بهذا الشكل. فالتناضح الكيميائي — شأنه شأن الشفرة الوراثية ودورة كربس وثلاثي فوسفات الأدينوسين — شائع في كل أشكال الحياة، ويبدو أنه كان من سمات آخر سلف مشترك عام. يفسر لنا مارتن وراسل السبب.

بشكل عام، التناضح الكيميائي هو حركة البروتونات عبر غشاء (ومن هنا جاء التشابه في الاسم مع عملية التناضح، التي تعني حركة الماء عبر غشاء). في عملية التنفس، يحدث الآتي: تُنتزَع الإلكترونات من الغذاء وتُمرَّر على امتداد سلسلة من النواقل إلى الأكسجين، وتُستخدَم الطاقة المحررة عند نقاط متعددة في دفع البروتونات عبر غشاء، وتكون النتيجة تدرج البروتونات عبر الغشاء. يعمل الغشاء كسَدٍّ كهرومائي. ومثلما تُحرِّك المياهُ المندفعةُ من أعلى المخزون التوربيناتِ لتوليد الكهرباء، داخل الخلايا يتسبب تدفُّق البروتونات عَبْر توربينات البروتينات الموجودة في الغشاء في بدء عملية تخليق ثلاثي فوسفات الأدينوسين. لم تكن هذه الآلية متوقعة بالمرة؛ فبدلًا من وجود تفاعل أنيق مباشر بين جزيئين، أُقْحِمَ تدرج غريب للبروتونات في المنتصف.

الكيميائيون معتادون على التعامل مع الأرقام الصحيحة؛ فليس من الممكن للجزيء أن يتفاعل مع نصف جزيء آخر. ربما يكون أغرب ملامح التناضح الكيميائي هو توافر العديد من أجزاء الأرقام الصحيحة. كم إلكترونًا نحتاج أن ننقله لإنتاج جزيء واحد من ثلاثي فوسفات الأدينوسين؟ ما بين ٨ إلى ٩ إلكترونات. وكم بروتونًا؟ أدق التقديرات الحالية هو ٤٫٣٣ بروتونًا. لم يكن لهذه الأرقام معنى على الإطلاق، إلى أن تَمَّ إدراك قدرة التدريج على التوسط. إن التدريج، في نهاية المطاف، مُكَوَّن من الملايين من عمليات التدرج؛ أي لا ينقسم إلى أرقام صحيحة. والمزية الكبرى للتدريج هي أن بإمكان تفاعل واحد أن يتكرر مرارًا وتكرارًا فقط من أجل توليد جزيء ثلاثي فوسفات الأدينوسين واحد. فإذا أطلق تفاعلٌ واحد بعينه جزءًا من مائة من الطاقة المطلوبة لتوليد جزيء ثلاثي فوسفات الأدينوسين واحد، تكرَّرَ هذا التفاعل مائة مرة، بانيًا التدرج خطوة بخطوة إلى أن يصير مخزون البروتونات كبيرًا بما يكفي لتوليد جزيء ثلاثي فوسفات أدينوسين

واحد. فجأة صارت الخلية قادرة على الادخار، وصار لديها جيب مليء بالعملات النقدية صغيرة القيمة.

ما الذي يعنيه كل هذا؟ لِنَعُدْ إلى تفاعل الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون. لا تزال البكتيريا تتكلف جزيئًا واحدًا من ثلاثي فوسفات الأدينوسين لبدء التفاعل، لكنها الآن صارت قادرة على توليد أكثر من جزيء ثلاثي فوسفات الأدينوسين واحد؛ لأنها قادرة على الادخار حتى تتمكن من تصنيع جزيء ثلاثي فوسفات أدينوسين ثانٍ. ربما لا تكون عيشة مترفة لكنها نزيهة. وأهم ما في الأمر أنها تصنع الفارق بين القدرة على النمو وعدم القدرة على النمو. إذا صحَّ رأي مارتن وراسل، وصحَّ أيضًا أن أول أشكال الحياة نما من هذا التفاعل، فلا بد أن السبيل الوحيد الذي تركت به الحياة الفوهات البحرية العميقة كان التناضح الكيميائي. ومن الصحيح والمؤكد أن أشكال الحياة الوحيدة القادرة على العيش من هذا التفاعل اليوم إنما تعتمد على التناضح الكيميائي وأيضًا لا تستطيع النمو دونه. ومن الصحيح بالمثل أن كل أشكال الحياة على الأرض تقريبًا تتقاسم نفس الآلية العجيبة، مع أنه لم تكن هناك حاجة لها على الدوام. لماذا؟ أعتقد أن السبب ببساطة هو أنها ورثتها عن سلف مشترك لم يستطع الحياة دونها.

لكن هنا يكمن السبب الرئيسي وراء صحة آراء مارتن وراسل؛ استخدام البروتونات. لماذا مثلًا لا تُستخدَم ذرات الصوديوم أو البوتاسيوم أو الكالسيوم المشحونة والمستخدمة من جانب أنظمتنا العصبية؟ لا يُوجَد سبب جليٌّ يُفسِّر تفضيل البروتونات عن أي تدريج من نوع آخر من الجسيمات المشحونة، وهناك بالفعل بعض البكتيريا التي تولد تدريجًا للصوديوم بدلًا من تدريج البروتون، بالرغم من ندرة الأمر. أظن أن السبب الرئيسي يعود إلى سمات فوهات راسل. تذكَّرْ أن الفوهات تنفث السوائل القلوية في المحيط الحمضي بفعل ثاني أكسيد الكربون الذائب فيه. تتحدد الأحماض من خلال البروتونات؛ فالحمض غني بالبروتونات بينما السائل القلوي يفتقر إليها. وبهذا يتسبب نفث السوائل القلوية في المحيطات الحمضية في إنتاج تدريج طبيعي للبروتونات. بعبارة أخرى تتسم خلايا الأملاح المعدنية الموجودة في فوهات راسل القلوية بالتناضح الكيميائي بصورة طبيعية. وقد أوضح راسل نفسه هذا الأمر منذ عدة سنوات، لكن إدراك أنه ليس بوسع البكتيريا أن تترك الفوهات دون تناضح كيميائي كان أحد ثمار تعاونه مع مارتن، الذي كان يدرس علم طاقة الميكروبات. وهكذا لا تُولِّد هذه المفاعلات الكهروكيميائية جزيئات عضوية وثلاثي فوسفات الأدينوسين وحسب، بل وفرت أيضًا خطة هروب؛ طريقة التغلب على مشكلة الورقة النقدية فئة عشرة جنيهات غير القابلة للتجزؤ.

بالطبع لن يكون لتدريج البروتونات الطبيعي فائدة إلا إذا استطاعت الحياة تسخيره، وبعد ذلك توليد تدريجها الخاص. ومع أنه من الأسهل بالتأكيد تسخير التدريج الموجود بالفعل عن توليد شيء جديد من نقطة الصفر، فإن كلتا الطريقتين ليست مباشرة. لقد تطوَّرَتْ هذه الآليات بواسطة الانتقاء الطبيعي بلا شك، واليوم هي تحتاج إلى بروتينات عديدة تُحدِّدها جينات، ولا يُوجَد سبب يدعونا للافتراض أن مثل هذا النظام المعقد يمكن أن يكون قد تطوَّر في المقام الأول دون بروتينات أو جينات؛ جينات مكونة من الدي إن إيه. وهكذا لدينا حلقة مفرغة مثيرة للاهتمام. فلم يكن بمقدور الحياة أن تغادر الفوهات حتى تتعلم تسخير تدريجها الخاص للتناضح الكيميائي، لكن لم يكن بمقدورها تسخير تدريجها الخاص إلا باستخدام الجينات والدي إن إيه. يبدو أنه لا مفر من الأمر؛ فمن المؤكد أن الحياة طورت درجة مدهشة من التعقيد وهي في حضَّاناتها الصخرية.

يرسم لنا هذا صورةً غير عادية لآخر سلف مشترك عام للحياة على الأرض. وإذا صحَّ رأي مارتن وراسل — وأعتقد أنه صحيح — فلن يكون هذا السلف خلية حية مستقلة، بل متاهة صخرية من خلايا الأملاح المعدنية، تتخللها جدران محفِّزة مؤلفة من الحديد والكبريت والنيكل، وتستمد الطاقة من تدريجات البروتونات الطبيعية. كانت أولى صور الحياة صخرة مسامية ولَّدَتْ جزيئات معقدة وطاقة، وصولًا إلى تكوين البروتينات والدي إن إيه نفسه. وذلك يعني أننا تتبعنا نصف القصة فقط في هذا الفصل. وفي الفصل التالي، سنتدبر النصف الثاني؛ اختراع أهم وأشهر الجزيئات قاطبة: المادة الوراثية (الدي إن إيه).

الفصل الثاني

دي إن إيه

شفرة الحياة

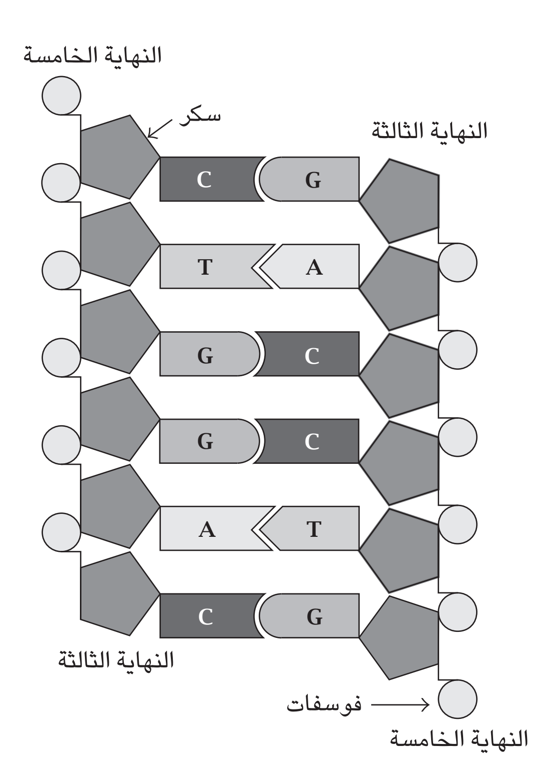
في العام ٢٠٠٣ عُلِّقَتْ لافتة زرقاء على حائط حانة إيجل في كامبريدج احتفالًا بالذكرى الخمسين لتحوُّلٍ غير معتاد في محادثات الحانات. ففي الثامن والعشرين من فبراير عام ١٩٥٣، وفي وقت الغداء، اندفع شابَّان عاديَّان — جيمس واطسون وفرانسيس كريك — إلى الحانة وأعلنا أنهما اكتشفا سر الحياة. ومع أن الأمريكي المنفعل والبريطاني الفصيح ذوَي الضحكة المثيرة للضيق لا بد أنهما بديا أحيانًا على شفا القيام بعرض كوميدي مشترك، فإنهما في تلك المرة كانا جادَّيْن، ونصف مُحِقَّيْن. فإذا كان بالإمكان القول إن للحياة سرًّا، فهو الدي إن إيه بالتأكيد. لكن واطسون وكريك، بالرغم من براعتهما، لم يدركا سوى نصف السر.

في ذلك الصباح، توصَّلَ واطسون وكريك إلى أن الدي إن إيه عبارة عن لولب مزدوج. كانت تلك وثبة عقلية مُلهَمة مبنية على خليط من العبقرية وبناء النماذج والتفكير الكيميائي وعدد قليل من صور انكسار الأشعة السينية المختلسة، وكان تصورهم، حسب كلمات واطسون، «جميلًا للغاية، لدرجة أنه لا بد أن يكون صحيحًا». وكلما تحدَّثا في وقت الغداء ذاك زادت معرفتهما بأنه كذلك. نُشِر حلهما في مجلة «نيتشر» في الخامس والعشرين من أبريل على هيئة خطاب من صفحة واحدة، لا يختلف كثيرًا عن إعلانات التهنئة بالمواليد في الجرائد المحلية. اختتم الخطاب المكتوب في لهجة متواضعة غير معتادة (اشتهر عن واطسون أنه كتب قائلًا: إنه لم يحدث قط أن قابل كريك وهو في مزاج متواضع، ولم يكن واطسون نفسه بأفضل حالًا هو الآخر)، بعبارة خجولة لا

تفي الإنجاز حقه قالا فيها: «نعتقد أن نموذج الأزواج الذي افترضناه يمكن أن يكون آلية نسخ ممكنة للمادة الوراثية.»

الدي إن إيه، بالطبع، هو أساس الجينات؛ إنه المادة الوراثية. فهو يُحدِّد الشفرة الجينية للبشر والأميبا وعش الغراب والبكتيريا وكل ما على الأرض من كائنات، خلا قلة من الفيروسات. ولولبه المزدوج أيقونة علمية؛ إذ يلتف خَيْطاه أحدهما حول الآخر في مطاردة لا نهاية لها. أوضح واطسون وكريك كيف يُكمِل كلٌّ خيطٍ الآخرَ على المستوى الجزيئي. وإذا فصلت بين الخيطين فسيعمل كلٌّ منهما كقالب بهدف إعادة تشكيل الخيط الثاني، ومن ثم يتكوَّن لدينا لولبان جديدان مما كان من قبل لولبًا واحدًا. وفي كل مرة يتناسل فيها كائن حي، فهو يمرر نسخة من الدي إن إيه الخاص به إلى ذريته. وكل ما يحتاجه الأمر هو الفصل بين خيطَي الدي إن إيه لإنتاج نسختين مطابقتين من الأصل.

مع أن الآلية الجزيئية المفصلة يمكن أن تصيب أي شخص بالصداع، فإن المبدأ نفسه بسيط على نحوٍ جميل فتَّان؛ فالشفرة الجينية ما هي إلا تتابع من الأحرف (أو بالمسمى الفني «قواعد»). ثمة أربعة أحرف في أبجدية الدي إن إيه؛ وهي: A، وT، وG، وC. وهي اختصار لكلٍّ من الأدينين والثايمين والجوانين والسايتوسين، لكننا لسنا بحاجة إلى القلق بشأن التسميات الكيميائية. فالمغزى هنا هو أنه لأن هذه القواعد محكومة بفعل شكلها وبنية روابطها؛ يرتبط الأدينين بالثايمين فقط فيما يرتبط السايتوسين بالجوانين فقط (انظر الشكل ٢-١). وإذا فصلت بين خيطَي اللولب المزدوج، فستنتصب من كل خيط أطراف الأحرف غير المرتبطة. وكل قاعدة أدينين مكشوفة لا يمكنها الارتباط إلا بقاعدة ثايمين، وكل قاعدة سايتوسين لا يمكنها الارتباط إلا بقاعدة جوانين، وهكذا دواليك. تلك الأزواج القاعدية لا يكمل بعضها بعضًا وحسب، بل إن بعضها — في الواقع — «يرغب» في الارتباط ببعض؛ فهناك شيء واحد فقط من شأنه أن يُسْعِد الحياة الكيميائية المملة لقاعدة الثايمين، وهو الارتباط اللصيق بقاعدة أدينين. وإذا جمعت بين القاعدتين فستتمايل روابطهما في تناغم بهيج. هذه هي الكيمياء الحقيقية: علاقة «انجذاب أساسية» حقيقية. وبهذا لا يكون الدي إن إيه مجرد قالب سلبي، بل تمارس كل خيوطه نوعًا من المغناطيسية كي تجذب القواعد المحببة إليها. فإذا فصلت بين الخيوط فستجد أنها تعاود التجمع تلقائيًّا مجددًا، وإذا حافظت على بعدها بعضها عن بعض؛ فسيكون كل خيط قالبًا ذا حاجة ماسة للعثور على شريكه المثالي.



شكل ٢-١: أزواج القواعد في الدي إن إيه. تقضي هندسة الأحرف بارتباط الجوانين G مع السايتوسين C، والأدينين A مع الثايمين T.

يبدو تتابُعُ الأحرف في الدي إن إيه طويلًا كأنه بلا نهاية له؛ فهناك مثلًا قرابة ٣ مليارات حرف (زوج قاعدي) في الجينوم البشري، أو باللغة العلمية ٣ جيجا من القواعد. يعني هذا أن مجموعة الكروموسومات الواحدة في نواة الخلية تحتوي على قائمة قوامها ٣ مليارات حرف منفرد. وإذا طبعت محتوى الجينوم البشري فسيملأ نحو ٢٠٠ كتاب، كلٌّ منها بحجم دليل الهاتف. وليس الجينوم البشري هو الأكبر بين الجينومات على الإطلاق. ومن المثير للدهشة أن هذا العدد يُعَدُّ قليلًا للغاية مقارنةً بالأميبا من نوع «أميبا دوبيا»، التي يحوي جينومها ٦٧٠ مليار قاعدة؛ أي نحو ٢٢٠ مرة ضعف الجينوم

البشري. ويبدو أن السواد الأعظم لهذا الجينوم «مهمل»؛ الذي لا يشفر أي شيء على الإطلاق.

في كل مرة تنقسم فيها خلية، فهي تضاعف كل محتوى الدي إن إيه الموجود بها، وهي عملية تتم في غضون ساعات. الجسم البشري يتألف من ١٥ مليون مليون خلية، وكل خلية منها تحتفظ بنسختها الأمينة من الدي إن إيه نفسه (نسختان في واقع الأمر). ولكي يتكوَّن الجسم البشري البالغ من خلية بويضة واحدة؛ تعيَّنَ على لوالب الدي إن إيه أن تنقسم كي تعمل كالقالب ١٥ مليون مليون مرة (وفي الواقع أكثر من هذا بكثير؛ لأن الخلايا التي تموت تحل محلها أخرى طوال الوقت). وكل حرف يُنسَخ بدقة تصل إلى حد المعجزة، بحيث يُعاد إنتاج النسخة الأصلية بنسبة خطأ قَدْرها نحو حرف واحد في كل ألف مليون. وعلى سبيل المقارنة، كي يعمل الناسخ بدقة مماثلة سيتعيَّن عليه أن ينسخ الإنجيل بالكامل ٢٨٠ مرة قبل أن يرتكب خطأً واحدًا. في الحقيقة، لم يُحقِّق الناسخون هذه النسبة من النجاح؛ إذ إنه تُوجَد ٢٤ ألف مخطوطة يدوية باقية من العهد الجديد، بَيْد أنه لا تُوجَد نسختان منها متطابقتان بالكامل.

لكن حتى في الدي إن إيه تتراكم الأخطاء، وقد يكون سبب ذلك حجم الجينوم الكبير. تُسمَّى هذه الأخطاء الطفرات الموضعية، وهي تحدث حين يحل حرف محل آخر على سبيل الخطأ. وفي كل مرة تنقسم فيها الخلية البشرية، من المتوقع أن تنتج ثلاث طفرات في كل مجموعة من الكروموسومات. وكلما انقسمت الخلية أكثر زاد تراكم هذه الطفرات، إلى أن تسهم في نهاية المطاف في ظهور أحد الأمراض كالسرطان. أيضًا تَعْبُر الطفرات الأجيال؛ فإذا نمت البويضة الملقحة وصارت جنينًا لأنثى، فستستغرق نحو ثلاثين دورة من الانقسام الخلوي كي تكون بويضة جديدة، وكل دورة تضيف القليل من الطفرات الإضافية. والأمر أسوأ في حالة الرجال؛ إذ إن تكوين الحيوان المنوي يحتاج نحو مائة دورة من الانقسام الخلوي، وكل دورة منها معرضة على نحو حتمي للمزيد من الطفرات. ولأن إنتاج الحيوانات المنوية يتواصل طوال الحياة، في دورة تلو الأخرى من الانقسام الخلوي، فكلما كان الرجل أكبر سنًّا صار الناتج أسوأ. وكما قال عالم الوراثة جيمس كرو فإن أكبر خطر مسبب للطفرات في أي جماعة سكانية هو الرجال كبار السن المتمتعون بالخصوبة. لكن حتى الطفل العادي لوالدين شابين يملك في المتوسط نحو ٢٠٠ طفرة جديدة مقارنة بوالديه (لكن قلة قليلة من هذه الطفرات قد تكون مضرة على نحو مباشر).[١]

وهكذا بالرغم من الدقة المذهلة التي يُنسَخ بها الدي إن إيه، تحدث تغييرات. فكل جيل مختلف عن سابقه، ليس فقط لأن الجينات تتمازج بفعل العملية الجنسية، بل أيضًا لأننا جميعًا نحمل طفرات جديدة. العديد من هذه الطفرات طفرات «موضعية» كالتي تحدَّثْنا عنها؛ مجرد تغيير في حرف وحيد بالدي إن إيه، بَيْدَ أن بعضها أكثر عنفًا. تتضاعف كروموسومات بأكملها أو تفشل في الانفصال، تُحذف رقع كاملة من الدي إن إيه، تُدخل فيروسات أجزاءً من الدي إن إيه الخاص بها، تعكس أجزاء من الكروموسومات نفسها، ومن ثم تعكس تتابع أحرفها. الاحتمالات لا نهاية لها، ومع ذلك فإن أغلب التغيرات نادرًا ما يكون لها علاقة بالبقاء على قيد الحياة. بالنظر إلى الجينوم على هذا النحو، يبدو وكأنه جحر هائج من الأفاعي، بينما كروموسوماته الأفعوانية تندمج وتنقسم على نحوٍ متواصلٍ دون كلل. والانتقاء الطبيعي، من خلال التخلص من كل هذه الوحوش عدا قلة قليلة منها، هو في الواقع قوة هادفة للاستقرار. فالدي إن إيه يتغير ويتحور، بينما الانتقاء الطبيعي يحافظ على استقامة الأمور. وأي تغيرات إيجابية يُحافظ عليها، فيما تُجهض أي أخطاء أو تغيرات خطيرة، حرفيًّا. أما عن الطفرات الأخرى، الأقل خطورة، فقد تكون مرتبطة بأمراض تظهر لاحقًا في مراحل متقدمة من الحياة.

إن التتابع المتغيِّر للأحرف داخل الدي إن إيه يقبع خلف كل ما نقرأ عنه تقريبًا في الصحف ويتعلق بجيناتنا. مثلًا البصمة الوراثية — المستخدمة في إثبات الأبوة أو اتهام الرؤساء أو إدانة المجرمين بعد عقود من ارتكابهم الجرائم — مبنية على الاختلافات في تتابعات الأحرف بين الأفراد. ولأن ثمة عددًا كبيرًا للغاية من الاختلافات في الدي إن إيه، يكون لدى كل شخص منا «بصمة» وراثية خاصة به. وبالمثل، تعتمد فُرَص إصابتنا بأمراض كثيرة على اختلافات طفيفة في تتابعات الدي إن إيه. وفي المتوسط، يتباين البشر بمعدل حرف واحد كل ألف حرف أو نحو ذلك، ما يَصِل مجموعُه من ٦ إلى ١٠ ملايين اختلاف في الحروف الفردية في الجينوم البشري، والمعروفة باسم «الاختلافات الفردية متعددة الأشكال للنيوكليوتيد» يعني وجود هذه الاختلافات الفردية أننا جميعًا نحمل نسخًا مختلفة اختلافًا طفيفًا من الجينات عَيْنِها. ومع أن أغلب هذه الاختلافات الفردية عديمة الأثر، فإن بعضها مرتبط إحصائيًّا بأمراض على غرار الداء السكري وألزهايمر، وإن كانت الكيفية المحددة التي تفرض بها تأثيراتها كثيرًا ما تكون غير مؤكدة.

وبالرغم من هذه التغيرات الفردية، فإنه لا يزال بمقدورنا الحديث عن «جينوم بشري» واحد؛ إذ إنه بغضِّ النظر عن تلك التغيرات فإن ٩٩٩ من كل ألف حرف لا تزال

متطابقة فينا جميعًا. ثمة سببان لهذا: الزمن، والانتقاء. من المنظور التطوري، لم يمر زمن كبير منذ أن كنا جميعًا من القردة العليا، بل في الواقع يمكن لمتخصص في علم الحيوان أن يؤكد أننا ما زلنا كذلك. وعلى افتراض أن البشر انفصلوا عن سلفنا المشترك مع الشمبانزي منذ نحو ٦ ملايين عام، وراكموا الطفرات بمعدل ٢٠٠ طفرة لكل جيل منذئذٍ، فهذا يعني أنه لم يُتَحْ لنا زمن إلا لتعديل نحو ١ بالمائة من جينومنا. وبما أن الشمبانزي تطوَّروا هم أيضًا بمعدل مُشابِه، فيمكننا من الناحية النظرية أن نتوقَّع وجود اختلاف قَدْره ٢ بالمائة بين النوعين. وفي الحقيقة نسبة الاختلاف أقل من هذا؛ إذ إنه من ناحية تتابعات الدي إن إيه، فإن البشر والشمبانزي متطابقان بنسبة ٩٨,٦ بالمائة.[٢] سبب هذا هو أن التطور يكبح جماح هذه العملية، عن طريق التخلص من أغلب التغيُّرات المؤذية. وإذا تم التخلص من التغيرات بواسطة الانتقاء، فإن التتابعات المتبقية تكون على نحو بديهيٍّ أكثر تشابهًا فيما بينها عما قد يكون الحال عليه إذا سارت عملية التغيُّر دون قيود. أي إن عملية الانتقاء، كما ذكرنا من قبل، تحافظ على استقامة الأمور.

بالعودة أكثر إلى الأزمنة الغابرة، تتعاون هاتان السمتان — الزمن والانتقاء — لإنتاج أروع الصور وأكثرها تعقيدًا. فكل أشكال الحياة على كوكبنا مترابطة، ويبيِّن لنا السجل المقروء لأحرف الدي إن إيه كيف حدث هذا بالضبط. فمن خلال مقارنة تتابعات الدي إن إيه يمكننا أن نحسب إحصائيًّا مدى قربنا من أي نوع آخر، على غرار القردة أو الجرابيات أو الزواحف أو البرمائيات أو الأسماك أو الحشرات أو القشريات أو الديدان أو النباتات أو الأوليات أو البكتيريا، اختر ما شئت؛ فكل الأنواع تتحدد بواسطة تتابعات قابلة للمقارنة من الدي إن إيه، بل إننا نتشارك مجموعات من التتابعات في العموم؛ تلك الأجزاء التي حفظها الانتقاء العام، بينما تغيرت أجزاء أخرى على نحوٍ يستحيل معه التعرف عليها. فإذا قرأت تتابعات الدي إن إيه الخاصة بأرنب فستجد نفس التتابعات اللانهائية من القواعد، بعض القواعد مطابقة لتتابعاتنا، وبعضها مختلف، وكلها تتمازج على نحو دائم التغير كما المشكال. الأمر عينه ينطبق على نبات الشَّوْك؛ إذ تكون التتابعات متطابقة — أو متشابهة — في مواضع، لكن السواد الأعظم منها مختلف الآن، وهو ما يعكس الحقب الزمنية الشاسعة التي تفصلنا عن سلفنا المشترك معها، وطرق الحياة المختلفة تمامًا التي نعيشها. لكن لا تزال الكيمياء الحيوية واحدة؛ فكل الكائنات مبنية من خلايا تعمل على النحو ذاته تقريبًا، وهذه الخلايا لا تزال تتحدَّد بواسطة تتابعات متشابهة من الدي إن إيه.

في ظل أوجه الشبه الكيميائية الحيوية هذه، قد نتوقع أن نجد تتابعات مشتركة حتى مع أبعد صور الحياة عنا؛ كالبكتيريا، وهو ما يحدث بالفعل. لكن في الواقع لا يُوجَد مجال للحيرة هنا؛ لأن تشابه التتابعات لا يُحدَّد على مقياس يتراوح من ٠ إلى ١٠٠ بالمائة، كما قد نتوقع، بل على مقياس قَدْرُه من ٢٥ إلى ١٠٠ بالمائة. وهذا يعكس أربعة الأحرف المكوِّنة للدي إن إيه. فإذا حلَّ حرفٌ محلَّ آخَرَ على نحوٍ عشوائي، فثمة احتمالية قَدْرها ٢٥ بالمائة أن يكون الحرف الجديد هو نفسه القديم. وبالمثل، إذا تمَّ تكوين قطاع عشوائي من الدي إن إيه في المختبر، فمن المحتم وجود نسبة تشابه قَدْرها ٢٥ بالمائة على الأقل مع أحد جيناتنا المختارة عشوائيًّا؛ إذ إن احتمالية أن يتوافق كل حرف مع حرف مقابل في الدي إن إيه البشري هي الربع. ونتيجة لذلك؛ فإن فكرة أن الإنسان «نصف موزة» لأننا نتشارك ٥٠ بالمائة من تتابعات جينومنا مع الموز هي فكرة مضللة، وهذا على أقل تقدير. وبالمنطق نفسه، أي قطاع مولد عشوائيًّا من الدي إن إيه سيكون ربع بشري. وما لم نعرف ما تعنيه الأحرف بالفعل، فلن نستفيد أبدًا من مثل هذه المعلومات.

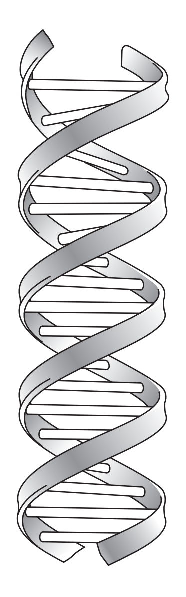
ولهذا السبب لم يتوصَّل واطسون وكريك إلا لنصف سر الحياة في صبيحة ذلك اليوم من عام ١٩٥٣. لقد عرفا بنية الدي إن إيه وفهما كيف يعمل كل خيط من خيوط الدي إن إيه كقالب لخيط آخر، وبهذا يُشكِّل الشفرة الوراثية لكل كائن حي. لكن ما لم يذكراه في ورقتهما البحثية الشهيرة، وما استغرق عشر سنوات أخرى من البحث البارع لاكتشافه، هو ما يحمله كل تتابع من الأحرف من شفرة وراثية. وبالرغم من افتقاره للرمزية الجليلة الخاصة باللولب المزدوج، ذلك اللولب الذي لا يكترث البتة لماهية الأحرف التي يُؤْوِيها في ثناياه؛ فإن فكَّ طلاسم شفرة الحياة ربما كان هو الإنجاز الأعظم والاكتشاف الذي شارك فيه كريك نفسه على نحوٍ بارز. والأهم من ذلك، من منظور فصلنا هذا، أن الشفرة التي فُكَّتْ طلاسمها — والتي مثلت في البداية أكثر الأمور المحبطة والمثيرة للحيرة في البيولوجيا الحديثة — تمنحنا أفكارًا شيقة حول الكيفية التي تطوَّرَ بها الدي إن إيه في المقام الأول، منذ نحو ٤ مليارات عام.

يبدو الدي إن إيه حديثًا للغاية، لدرجة أنه من العسير أن ندرك مدى قلة ما كنا نعرفه بشأن مبادئ البيولوجيا الجزيئية في عام ١٩٥٣. لقد ظهر الدي إن إيه للنور من خلال الورقة البحثية الأصلية لواطسون وكريك ونُسخت بنيته التي وضعت لها أوديل، زوجة

كريك الفنانة، رسمًا تخطيطيًّا على صورة السلم الملتوي وظلت هكذا دون تغيير لنصف قرن (انظر الشكل ٢-٢). وقد رسم كتاب واطسون الشهير «اللولب المزدوج»، الذي وضعه في ستينيات القرن العشرين، صورةً حديثةً للعلم. في الواقع كانت هذه الصورة من التأثير بحيث بدا أن الحياة تحاكي الفن. عن نفسي، قرأت كتاب واطسون وأنا بالمدرسة وحلمت بجائزة نوبل وبالاكتشافات البارزة. لكن بالنظر لحالي وقتها، أدرك الآن أن إحساسي بالكيفية التي كانت تتم بها ممارسة العلم فعليًّا كان مبنيًّا بالكامل تقريبًا على كتاب واطسون، وعلى الأغلب نبع تحرُّري الحتميُّ من هذا الوهم وأنا بالجامعة من فشل الواقع في الارتقاء إلى مستوى الإثارة الذي حسبته عليه. وبدلًا من هذا اتجهتُ صوب تسلُّق الجبال بحثًا عن الإثارة، واستغرق الأمر منِّي أعوامًا حتى بدأت الإثارة العقلية في التسرب مجددًا إليَّ.

بَيْدَ أن ما تعلمته في الجامعة، كله تقريبًا، كان مجهولًا لواطسون وكريك في عام ١٩٥٣. من المتعارف عليه اليوم أن «الجينات تحمل شفرة تصنيع البروتينات»، لكن في أوائل خمسينيات القرن الماضي لم يكن ثمة اتفاق كبير حول هذا الأمر. وحين وصل واطسون لأول مرة إلى كامبريدج في عام ١٩٥١ سرعان ما أثار حنقه التشكك المتفتح من جانب ماكس بيرتس وجون كندرو. فبالنسبة لهما، لم يُثْبَت بعد بما لا يدع مجالًا للشك أن الجينات تتألف من الدي إن إيه وليس البروتينات. وبينما كانت البنية الجزيئية للدي إن إيه مجهولة، فإن تركيبها الكيميائي كان بسيطًا للغاية ونادرًا ما كان يتغير من نوع إلى آخر. فإذا كانت الجينات هي أساس الوراثة وتحمل شفرة الاختلافات العديدة بين الأفراد والأنواع؛ فكيف يمكن لمثل هذا المركب الرتيب، غير المتغير في تركيبته من الحيوان إلى النبات إلى البكتيريا، أن يُفسِّر ولو من بعيد ذلك الثراء والتنوع اللذين تتسم بهما الحياة؟ بدت البروتينات، بتنوعها اللانهائي، أكثر ملاءمة لمثل هذه المهمة الضخمة.

كان واطسون نفسه واحدًا من قلة من البيولوجيين الذين اقتنعوا بالتجارب شديدة التدقيق التي أجراها الكيميائي الحيوي الأمريكي أوزوالد إفري، والمنشورة عام ١٩٤٤، والتي تُظهِر أن الجينات تتكوَّن من الدي إن إيه. وحده حماس واطسون وإيمانه حفز كريك على القيام بالمهمة التي بين أيديهما؛ ألا وهي فكُّ طلاسم بنية الدي إن إيه. وبمجرد حل هذه القضية، صار التساؤل عن الشفرة ملحًّا. ومجددًا، تثير أعماقُ الجهل دهشةَ الجيل المعاصر؛ فالدي إن إيه ما هو إلا تتابع لانهائي من أربعة أحرف وحسب، في ترتيب يبدو وكأنه ترتيب عشوائي. كان من السهل، نظريًّا، رؤية أن ترتيب هذه الأحرف يمكن



شكل ٢-٢: لولب الدي إن إيه المزدوج، يبيِّن كيف يمكن لخيطَيِ الدي إن إيه الالتفاف أحدهما حول الآخر. الفصل بين الخيطين يُمكِّن كلًّا منهما من العمل كقالب لخيط جديد متمم له.

أن يُمثِّل شفرة من نوعٍ ما لتخليق البروتينات؛ فالبروتينات هي الأخرى مكوَّنة من تتابع من الوحدات البنائية المسماة الأحماض الأمينية. ومن المفترض أن يُمثِّل تتابُعُ الأحرف داخل الدي إن إيه شفرةً لتتابع الأحماض الأمينية داخل البروتينات، لكن إذا كانت هذه الشفرة واحدة، كما بدا بالفعل، فمن الحتميِّ أن تكون قائمة الأحماض الأمينية واحدة هي الأخرى. ولم يكن هذا مؤكدًا بأي حال من الأحوال. لم يتم التفكير في هذا الأمر إلى أن جلس واطسون وكريك في حانة إيجل لِيخطَّا القائمة الحصرية للأحماض الأمينية العشرين، والموجودة في المراجع الدراسية اليوم، وهما يتناولان الغداء. ومن المثير للدهشة أنه على الرغم من أن أيًّا منهما ليس بمتخصص في الكيمياء الحيوية، فإنهما حدَّداها على نحو صحيح من المرة الأولى.

تحدَّد التحدي الآن وصار الأمر مجرد لعبة رياضية، لا يحكمها أيٌّ من التفاصيل الجزيئية التي تحفظها الأجيال التالية عن ظهر قلب. كان على أحرف الدي إن إيه الأربعة المختلفة أن تضع الشفرة الخاصة بالأحماض الأمينية العشرين. أسقط هذا إمكانية النسخ المباشر؛ إذ إنه من البديهي أن الحرف الواحد من أحرف الدي إن إيه لا يمكن أن يُمثِّل حمضًا أمينيًّا واحدًا. كما تم استبعاد فكرة الشفرة المزدوجة أيضًا، التي بموجبها لن يمكن تخليق أكثر من ١٦ حمضًا أمينيًّا (٤ × ٤). كانت هناك حاجة لما لا يقل عن ثلاثة أحرف؛ أي شفرة ثلاثية (أُثبِتَتْ لاحقًا على يد كريك وسيدني برينر)، تتشارك فيها ثلاثة أحرف من الدي إن إيه لعمل شفرة حمض أميني واحد، لكن بدا في هذا إهدار خطير؛ فالأحرف الأربعة يمكنها الاتحاد لتكوين ٦٤ شفرة ثلاثية (٤ × ٤ × ٤)؛ ومن ثم يمكنها عمل شفرة ٦٤ حمضًا أمينيًّا منفصلًا. لماذا إذن ٢٠ وحسب؟ كان من الضروري أن تتوافق الإجابة مع الأبجدية رباعية الأحرف، المرتَّبة في ٦٤ كلمة ثلاثية الأحرف، تحمل شفرة ٢٠ حمضًا أمينيًّا.

ولعل مما يستحق الذكر أن أول مَنْ قدَّم إجابة من نوعٍ ما على هذا السؤال لم يكن عالم أحياء، وإنما كان عالم فيزياء أمريكيًّا روسيَّ المولد، متحمسًا، يُدعى جورج جاموف، الذي عُرف أكثر بنظرياته عن الانفجار العظيم في نشأة الكون؛ إذ قال جاموف إن الدي إن إيه يُعتبَر — حرفيًّا — قالبًا للبروتينات التي تتكوَّن من أحماض أمينية تستقر في أخاديد ماسية الشكل فيما بين استدارات اللولب. إلا أن نظرية جاموف كانت تعدادية بالأساس، ولم يكن يكترث كثيرًا بأن يعلم أن البروتينات لا يتم بناؤها في نواة الخلية مطلقًا؛ ومن ثم، فلا تتماس مباشرةً مع الدي إن إيه. ثم صارت فكرته أكثر تجريدًا؛ إذ كان مقترحه في جوهره يقضي بوجود شفرة متراكبة، الأمر الذي يُعتبَر ذا ميزة عظيمة، تتمثل في تعظيم كثافة المعلومات، وهو ما أحبَّه المُنْكَبُّون على فك الشفرات الوراثية. تخيَّلْ تتابعًا يمكن قراءته هكذا ATCGTC. أول «كلمة» منه، أو لنُسَمِّها تسميةً تقنيةً هي الكودون، ستكون ATC، والثانية TCG، والثالثة CGT، وهكذا دواليك. ولكن من الأهمية بمكان أن نعرف أن الشفرات المتراكبة تقيِّد تتابع الأحماض الأمينية المسموح به وتحصره في نطاق ضيق. فإذا كانت الشفرة ATC تخص حمضًا أمينيًّا معينًا، فإنه يجب أن يكون متبوعًا بحمض أميني يكون الكودون الخاص به بادئًا بالحرفين TC، ومتبوعًا بثانٍ يجب أن يبدأ بالحرف C. وحينما يتم المرور بجميع التباديل الممكنة حتى الرمق الأخير، فإنه يبقى عدد كبير من الثلاثيات التي لا يسمح بتكوُّنها؛ حيث لا يمكن أن

تكون جزءًا من هذه الشفرة المتراكبة؛ لأن الحمض الأميني A يجب دائمًا أن يأتي تاليًا على الـ T، والـ T تاليًا على الـ C ... وهكذا. فكم عدد الثلاثيات المتبقية لتشفير الأحماض الأمينية؟ إن عددها ٢٠ بالضبط! هكذا يقول جاموف وكأنه ساحر يُخرج أرنبًا من قبعته.

كانت هذه أول فكرة من العديد من الأفكار الذكية التي تم نسفها بفعل معطيات لا ترحم؛ فجميع الشفرات المتراكبة ثبت خطؤها بفعل المقيدات النابعة من داخلها. وبدايةً نقول إن النظرية تزعم أن أحماضًا أمينية معينة يجب أن تظهر دائمًا بعضها إلى جوار بعض في البروتينات، ولكن جاء فريد سانجر، ذلك العبقري الهادئ الذي فاز بجائزتَيْ نوبل — إحداهما عن تحديد تتابع البروتينات، والأخرى عن تحديد تتابع الدي إن إيه — وكان في نفس ذلك الوقت مشغولًا بتحديد تتابع الأنسولين. ولم يلبث أن تبيَّن أن أي حمض أميني يمكن أن يكون إلى جوار أي حمض أميني آخر؛ إذ إن التتابع البروتيني لا يتم تقييده على الإطلاق. وكان ثمة مشكلة كبيرة ثانية، وهي أن أي طفرة موضعية (حيث تتم إزاحة حرف واحد ليحل محله حرف آخر) يتحتم أن تؤثر على أكثر من حمض أميني واحد في الشفرة المتراكبة، ولكن أظهرت المعطيات التجريبية أنه غالبًا ما يكون حمض أميني واحد فقط هو الذي تغيَّرَ. وببساطة، نقول إن الشفرة الحقيقية لا يحدث بها تراكب. وقد ثبت فساد نظرية جاموف عن الشفرات المتراكبة قبل اكتشاف الشفرة الحقيقية بوقت طويل، وكان المُنْكَبُّون على فكِّ الشفرات الوراثية في سبيلهم بالفعل للشك في أن خللًا ما يصيب هذه الفكرة بشكل أو بآخر.

ثم جاء كريك نفسه بعد ذلك، فافترض فكرةً كانت من الجمال لدرجة أن تبناها الجميع، بالرغم من شكواه هو نفسه من نقص المعطيات المعضدة للفكرة. استفاد كريك من الرؤى الجديدة المنبثقة من عدد من المختبرات المتخصصة في البيولوجيا الجزيئية، ومن أبرزها المختبر الجديد الخاص بواطسون في هارفرد. كان واطسون قد صار مهووسًا بالآر إن إيه؛ وهو نسخة معدلة من الدي إن إيه ذات خيوط مفردة وأقصر من خيوط الدي إن إيه، ويُوجَد في سيتوبلازم الخلية كما يُوجَد في نواتها. والأفضل من هذا، كما يعتقد واطسون، أن الآر إن إيه يدخل في بنية تلك الآلات الخلوية الدقيقة التي تُعرَف الآن بالأجسام الريبية أو الريبوسومات، والتي يبدو أنها موقع تخليق البروتينات. ومن ثم؛ فإن الدي إن إيه يسكن في النواة، خاملًا لا يتحرك، فإذا احتاج الأمر إلى بروتين ما فإن قسمًا من الدي إن إيه يُستخدَم كقالب لصنع نسخة من الآر إن إيه، الذي ينتقل

بعد ذلك إلى خارج النواة تجاه الريبوسومات المنتظرة في الخارج. وهذا الساعي المجنح سرعان ما أُطلِق عليه اسم الآر إن إيه المرسال. ومن ثم وضع واطسون فكرته في خطاب أرسله إلى كريك في وقت مبكر يرجع إلى عام ١٩٥٢ قائلًا فيه: «إن الدي إن إيه يصنع الآر إن إيه، وهذا الأخير يصنع البروتينات.» وكان السؤال الذي أثار اهتمام كريك هو: كيف تتم ترجمة التتابع المحدد للحروف في الآر إن إيه المرسال إلى تتابع من الأحماض الأمينية في بروتين ما؟

فكر كريك في هذا الأمر، وافترض أن رسالة الآر إن إيه يمكن ترجمتها بمساعدة سلسلة من جزيئات «مهايئة» محددة، واحدة لكل حمض من الأحماض الأمينية. وهذه أيضًا يجب أن تكون مصنوعة من الآر إن إيه، ويكون لكلٍّ منها كودونٌ مضادٌّ يمكنه أن يميز الكودون في الآر إن إيه المرسال ويرتبط به. وقال كريك إن المبدأ في هذا الأمر مطابق بالضبط لما يحدث في الدي إن إيه؛ إذ يرتبط الأدينين بالثايمين، فيما يرتبط السايتوسين بالجوانين، وهكذا.[٣] ويجب ملاحظة أن وجود تلك الجزيئات المهايئة كان أمرًا افتراضيًّا تمامًا في هذا الموضع، ولكن اكتُشِفَ وجودها بالفعل في غضون سنوات قليلة وتبيَّنَ أنها تتكون من الآر إن إيه كما تنبَّأ كريك. وهي الآن تُسمَّى وحدات الآر إن إيه الناقل. وقد بدأ هذا الصرح الذي تكوَّن يبدو مثل لعبة مكعبات «الليجو» التي تتألف من أجزاء يتم فكها وتركيبها لتكوين تراكيب رائعة وإن كانت سريعة الزوال.

في هذا الموضع أخطأ كريك، وسوف أشرح هذا الأمر ببعض التفصيل الآن — مع أن الواقع أكثر جموحًا مما توقع كريك — لأن أفكاره قد يكون لها ارتباط بالكيفية التي بدأ بها الأمر ككلٍّ في المقام الأول. فقد تصوَّرَ كريك الآر إن إيه المرسال مستقرًّا في سيتوبلازم الخلية مع بروز الكودونات منه وكأنها حلمات أثداء خِنزيرة، وكلٌّ منها مستعد لأن يلتقمه الآر إن إيه الناقل مثل خنزير رضيع. وفي نهاية الأمر، تصطف جميع وحدات الآر إن إيه الناقل وتستقر جنبًا إلى جنب على طول جسم الآر إن إيه المرسال بالكامل، مع بروز الأحماض الأمينية للخارج مثل ذيول خنازير دقيقة، على استعداد للارتباط معًا سريعًا لتكوين أحد البروتينات!

كانت المشكلة بالنسبة لكريك أن وحدات الآر إن إيه الناقل تأتي بشكل عشوائي، كما ظهرت في الساحة، وتربط أنفسها بأقرب كودون متاح. ولكن إذا لم تبدأ من البداية وتنتهي عند النهاية؛ فكيف يمكنها أن تعرف أين يبدأ أحد الكودونات وأين ينتهي الذي سبقه؟ وكيف يمكنها تحديد المكان الصحيح الذي تتم قراءته؟ فإذا كان التتابع يُقرأ

هكذا ATCGTC كما قلنا من قبل، فيمكن لآر إن إيه الناقل الارتباط بـ ATC ويرتبط التالي بـ GTC، ولكن ما الذي يمنع الآر إن إيه الناقل عن تمييز التتابع CGT في المنتصف والارتباط به بدلًا من الارتباط بالتتابع GTC؛ مما يؤدي إلى إرباك الرسالة ككلٍّ؟ وكانت الإجابة التعسفية لكريك هي عدم السماح بحدوث ذلك. فإذا كانت الرسالة ككلٍّ يجب قراءتها دون التباس، فلا يمكن أن تكون جميع الكودونات منطقية ذات مغزى. أيُّ الكودونات إذن يجب عدم السماح بها؟ من الواضح أن التتابعات المكونة فقط من A أو C أو U أو G لا يُسمَح بحدوثها؛ ففي وجود تسلسل مكوَّن من التتابع AAAAAA، لن تكون ثمة طريقة لتحديد موضع الهيكل الصحيح الذي تتم قراءته. ثم دار كريك بذهنه خلال جميع المجموعات الممكنة من الحروف. وباختصار نقول على هذا الأساس: إذا كان للكودون ATC أي مغزى ضروري، فإن جميع التباديل الأخرى المكونة من تلك الحروف الثلاثة يجب عدم السماح بها (فإذا سمحنا بالترتيب ATC، فإن الترتيبين TCA وCAT يجب منعهما). فكم عدد الاحتمالات المتبقية بعد ذلك؟ إن عددها ٢٠ بالضبط مرة أخرى! (فمن بين الكودونات الـ ٦٤ المحتملة، يجب حذف الاحتمالات AAA وUUU وCCC وGGG، فيتبقى ٦٠، ثم إذا تم السماح بتبديل دوري واحد بين كل ثلاثة أحرف، فإن ٦٠ إذا قسمناها على ٣ يكون الناتج ٢٠.)

وخلافًا للشفرات المتراكبة، فإن شفرة كريك لا تفرض قيودًا على ترتيب الأحماض الأمينية في أحد البروتينات، كما أن حدوث طفرة موضعية لا يُغيِّر بالضرورة اثنين أو ثلاثة من الأحماض الأمينية. وحينما تمَّ افتراض تلك الشفرة وعرضها، فإنها حلت مشكلة قراءة هيكل الكودونات بشكل رائع؛ إذ اختزلت الكودونات الـ ٦٤ إلى ٢٠ حمضًا أمينيًّا بطريقة مرضية من الناحية العددية، وكانت متوافقة تمامًا مع جميع المعطيات المعروفة. ولكنها ما زالت خطأً بالرغم من ذلك! ففي خلال بضع سنوات اتضح إمكان وجود آر إن إيه اصطناعي يتكوَّن بالكامل، بصورة نقية، من التتابع AAA (الذي استبعده كريك) ويمكنه بعد ذلك أن يصنع شفرة الحمض الأميني اللايسين، وأن يتحول إلى بوليمر بروتيني يتكوَّن بالكامل من اللايسين.

ومع زيادة تعقُّد الأدوات التجريبية تمكَّنَتْ مجموعات بحثية عدة، بشكل تدريجي، من ضم أجزاء الشفرة الحقيقية معًا في منتصف ستينيات القرن الماضي. وبعد الجهود المستميتة من المهتمين بالشفرة الجينية لفكِّ منظومة الشفرة القديمة ظهرت الحقيقة التي قد تبدو عشوائية على نحوٍ مثيرٍ للارتباك والحيرة. فالشفرة الحقيقية ليست أنيقة

(بمعنى أنها مليئة بالتكرار) وفيها تُشفَّر ثلاثة أحماض أمينية بستة كودونات مختلفة، بينما تُشفَّر أحماض أخرى بكودون واحد أو اثنين. جميع الكودونات لها فائدة، وثلاثة منها تقوم بدور «التوقيف الموضعي»، وبقيتها تشفِّر حمضًا أمينيًّا (أو أكثر). يبدو أنه لا يُوجَد نظام محدد، ولا تُوجَد أناقة ولا روعة، بل في الواقع يُعتبَر الأمر المضاد المثالي للفكرة القائلة إن الجمال دليل على الحقيقة في العلم.[٤] بل يبدو أنه لا يُوجَد أي سبب بنيوي معين يمكن أن تُعزى إليه الشفرة؛ فلا يظهر أي وجود لارتباطات كيميائية أو فيزيائية قوية بين الأحماض الأمينية وكودونات معينة.

وقد صرَّح كريك بأن تلك الشفرة الجديدة المخيبة للآمال هي «مصادفة مجمدة»، واكتفت الغالبية بالإيماء بالموافقة على هذا. وقد قال إنها «مجمدة» لأن أي تجاوزات أو أضرار — تحدث عند إزالة تجميدها — ستكون لها عواقب وخيمة؛ فأي طفرة واحدة تحدث عند نقطة معينة تغير أحد الأحماض الأمينية هنا أو هناك، وكذلك أي تغيير في الشفرة نفسها سيسبب تغييرًا كارثيًّا في كل شيء حوله. وهناك فرق بين حدوث خطأ مطبعي عَرَضي في كتابٍ ما، مما لا يغير المعنى كثيرًا، وبين تحويل الأبجدية كلها إلى خلط مشوَّه للحروف. ويستطرد كريك قائلًا إنه ما إن تُوضَع الشفرة في إطارها، فإن أي عبث آخر بتلك الشفرة قد تتم معاقبته بالموت؛ وهي وجهة نظر ما زالت ترن في آذان علماء الأحياء اليوم على نطاق واسع.

ولكن الطبيعة «العرضية» سبَّبَتْ مشكلةً لكريك. فلماذا تحدث مصادفة واحدة؟ لِمَ لا تكون عدة مصادفات؟ فإذا كانت الشفرة اعتباطية؛ فلن يكون ثمة فضل معين لأي شفرة على شفرة أخرى، ولن يكون ثمة مبرر لوجود «عنق زجاجة» انتقائي يكون فيه، على حد قول كريك، لأي نسخة معدلة من الشفرة «ميزة انتقائية تفوق بها جميع منافسيها وتجعلها تصمد وحدها.» وإذا لم يكن هناك أي عنق زجاجة؛ فلماذا لم يُوجَد عدد من الشفرات معًا في كائنات حية مختلفة؟

الإجابة البديهية هي أن جميع الكائنات الحية على ظهر الأرض تنحدر من أصل مشترك كانت الشفرة فيه ثابتة بالفعل. وبأسلوب فلسفي أكثر نقول إن الحياة نشأت مرة واحدة على الأرض؛ مما يجعلها تبدو حدثًا متفردًا غير مرجح، بل ربما حدثًا غريبًا. وفي اعتقاد كريك، هذا يوحي أن الحياة أشبه بعدوى، أو لقاح واحد. وقد مضى كريك في أفكاره قائلًا إن الحياة «بُذِرَت» في الأرض مثل مستعمرة بكتيرية اشتُقَّتْ من كائن غير أرضي واحد. واستطرد ذاهبًا إلى أن البكتيريا قد تم بذرها بذكاء متفوق — من

خارج الأرض — عمدًا من سفينة فضائية أُرسِلَتْ إلى الأرض، وهي فكرة أسماها «التبذُّر الشامل الموجَّه»، ووضع هذه الفكرة في كتاب بعنوان «طبيعة الحياة» نُشِرَ عام ١٩٨١. وقد علَّقَ مات ريدلي في كتابه الرائع عن سيرة كريك قائلًا: «إن موضوع فكرة كريك قد جعل عددًا غير قليل من الناس يُصابون بالدهشة والذهول؛ فإن ما كتبه كريك الرائع عن صور الحياة التي جاءت من الفضاء وبُذِرَتْ في العالم من مركبة فضائية لهو شيء عجيب! فهل أدار النجاح رأسه إلى هذا الحد؟!»

تتباين الآراء حول ما إذا كانت فكرة الشفرة العَرَضية تُبرِّر بالفعل هذا القَدْر الكبير من الجدل الفلسفي أم لا. لم تكن الشفرة نفسها بحاجة إلى أن تُقَدِّم أي مزايا، أو عيوب، معينة لكي تَعْبُر عنق زجاجة؛ فمن شأن أي عملية انتقاء قوية، بل من شأن أي حادث عَرَضي — كارتطام مذنب فضائي — أن يكون قد أهلك كل صور الحياة على الأرض وأبقى على نسخة وحيدة منها، تلك الشفرة التي صارت — بالتبعية — الشفرة الوحيدة الموجودة على الأرض. لكن حتى إذا كان هذا الاحتمال قائمًا، فقد كان توقيت كريك غير موفق. فمنذ بدايات ثمانينيات القرن العشرين، حينما كان كريك يؤلف كتابه، بدأنا ندرك أن شفرة الحياة ليست مجمدة وليست أيضًا حدثًا عشوائيًّا وقع مصادفة. فهناك أنماط خفية داخل الشفرة، ما يمكن أن نقول إنها «شفرة داخل الكودونات»، تعطي أمارة على أصولها التي ترجع إلى حوالي ٤ مليارات سنة مضت! ونحن الآن نعرف أن هذه الشفرة تختلف كثيرًا عن تلك التي رفضها المُنْكَبُّون على فكِّ الشفرات الوراثية، وأنها شفرة واحدة من بين مليون تستطيع أن تقاوم التغيير وأن تسرع وتيرة التطور في الآن ذاته.

إنها شفرة داخل الكودونات! تم تمييز أنماط مختلفة من الشفرة منذ عقد الستينيات حتى اليوم، ولكن أغلبها كان من السهل التجاوز عنه بوصفه محض شذوذ عجيب أو تذبذب إحصائي، وهو ما فعله كريك نفسه. وحتى حينما تجمع تلك الأنماط معًا، فإن النمط المجمَّع لا يبدو معقولًا بالقدر الكافي. لماذا؟ هذا سؤال جيد، ناقشه عالم في الكيمياء الحيوية من ولاية كاليفورنيا الأمريكية يُدعى بريان كيه ديفيز، الذي كان لديه اهتمام طويل الأمد بجذور الشفرة الجينية. يرى ديفيز أن فكرة «المصادفة المجمدة» ذاتها تجعلنا نتغاضى عن الاهتمام بأصول الشفرة؛ فلماذا ندرس تلك المصادفة أو نبحث فيها؟ إن المصادفات تحدث وكفى. وفيما وراء ذلك، يعتقد ديفيز أن حفنة الباحثين

الذين يحتفظون باهتمام خاص بهذا الأمر قد انخدعوا بتلك الفكرة السائدة عن وجود ما يمكن تسميته «الحساء البدائي». فإذا كانت الشفرة قد نشأت في «حساء» بدائي، فلا بد أن تكون أعمق جذورها متغلغلة في الجزيئات المرجح تولُّدها عن العمليات الفيزيائية والكيميائية الجارية داخل «الحساء». وهذا أوحى بوجود مجموعة أساسية من الأحماض الأمينية كأساس للشفرة، ثم أُضِيفَتْ أحماض أخرى فيما بعد. وقد كان في هذه الفكرة ما يكفي من الحقيقة لجعل الدليل عليها مثيرًا للاهتمام ومُحيِّرًا في الوقت نفسه. لكن فقط حين ننظر إلى الشفرة كنتاج لما يُسمَّى عملية «التخليق الحيوي» — التي تكون الخلايا بمقتضاها قادرة على صنع وحداتها البنائية من الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون — يكون لتلك الأنماط التي تحدَّثْنا عنها سابقًا معنى.

إذن ما هذه الأنماط المراوغة؟ يُوجَد نمط مختلف يرتبط بكل حرف من الشفرة الثلاثية، والحرف الأول هو الأكثر لفتًا للأنظار؛ لأنه يرتبط بالخطوات التي تُحوِّل مادة طليعية بسيطة إلى حمض أميني. وهذا المبدأ مذهل لدرجة أنه يستحق أن نوضحه باختصار. ففي الخلايا اليوم، تُصنَع الأحماض الأمينية عَبْر سلسلة من الخطوات البيوكيميائية، بدءًا من تلك المواد الطليعية البسيطة المختلفة. المدهش أنه تُوجَد رابطة بين أول حرف من الكودون ثلاثي الشفرة وبين تلك المواد الطليعية البسيطة. ومن ثم؛ فإن جميع الأحماض الأمينية التي نشأت من المادة الطليعية التي تُسمَّى «البيروفات» مثلًا تتشارك في نفس الحرف الأول من الكودون؛ وهو T في هذه الحالة.[٥] أستخدم هنا مثال البيروفات لأننا صادفناه بالفعل في الفصل الأول؛ إذ يمكن أن يتكوَّن في الفوهات الحرمائية من غازَيْ ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين في وجود عوامل مساعدة، هي الأملاح المعدنية الموجودة في تلك الفوهات، ولكن مادة البيروفات ليست الوحيدة في هذا الصدد؛ فكل المواد الطليعية للأحماض الأمينية هي جزء مما يُسمَّى دورة كربس التي تُشكِّل لب الكيمياء الحيوية لجميع الخلايا، ومن المفترض أن تتكوَّن في ذلك النوع من الفوهات الحرمائية المذكورة في الفصل الأول. والمعنى الضمني، الذي نقر بأنه لا يزال ضعيفًا عند هذه النقطة ولكن يُتوقَّع أن يزداد عمقًا، هو أنه تُوجَد رابطة بين الفوهات الحرمائية وبين الموضع الأول للشفرة الثلاثية.

ماذا عن الحرف الثاني؟ هنا يُوجَد ارتباط مهم بالدرجة التي يصل إليها الحمض الأميني في كونه قابلًا للذوبان في الماء أو غير قابل لذلك، بمعنى درجة محبته أو كراهيته للماء؛ فالأحماض الأمينية المحبة للماء تذوب فيه، بينما لا تختلط الأحماض الأمينية

الكارهة للماء به، بل تذوب في المواد الدهنية أو الزيتية، مثل الأغشية الدهنية للخلايا. ويمكن تصنيف الأحماض الأمينية إلى طيف واسع، يمتد من تلك «الكارهة للماء جدًّا» إلى «المحبة للماء جدًّا»، وهذا الطيف هو الذي يحمل صلة مع الموضع الثاني للشفرة الثلاثية. فخمسة من الأحماض الأمينية الستة الأكثر كراهية للماء لديها T كقاعدة وسطى. بينما جميع الأحماض الأمينية الأكثر حبًّا للماء لديها A في ذلك الموضع. أما الأحماض الأمينية المعتدلة في درجة تقبُّلها للماء فلديها G أو C هناك. وبصفة عامة، تُوجَد علاقات حتمية قوية بين الموضعين الأولين لكل كودون وبين الحمض الأميني الذي يتم تشفيره لأي أسباب كانت.

يقع الحرف الأخير في موضع الانحلالية، حيث تعاني ثمانية أحماض أمينية مما يُطلَق عليه «الانحلالية الرباعية»، وهو لفظ تقني غريب. يعني علماء الكيمياء الحيوية ببساطة بهذا أن الموضع الثالث للكودون خالٍ تمامًا من المعلومات، ولا يهم أي قاعدة من القواعد تُوجَد فيه؛ فكل الاحتمالات الأربعة تشفِّر نفس الحمض الأميني. وفي حالة الجلايسين، الذي يتم تشفيره من قبل الكودون الثلاثي GGG، يمكن تحويل حرف الـ G الأخير إلى T أو A أو C؛ ومع ذلك لا يزال كل كودون ثلاثي يشفر الجلايسين.

لانحلالية الشفرة في الموضع الثالث دلالات عدة مثيرة للاهتمام؛ فقد أوردنا سابقًا أن الشفرة المزدوجة يمكنها أن تشفر ما يصل إلى ١٦ من بين الأحماض الأمينية العشرين المختلفة. فإذا حذفنا منها الأحماض الأمينية الخمسة الأكثر تعقيدًا (تاركين ١٥ بالإضافة إلى كودون توقيفي واحد) فإن الأنماط التي في الحرفين الأولين من الشفرة تصير أكثر قوة. ولهذا نقول: لعل الشفرة البدائية الأصلية كانت مزدوجة، ثم بعد ذلك فقط تمددت فصارت شفرة ثلاثية، وذلك عن طريق «اقتناص الكودون»؛ إذ تنافست الأحماض الأمينية فيما بينها على الموضع الثالث. وإذا كان الأمر كذلك، فربما كان لأقدم الأحماض الأمينية ميزة «غير عادلة» في «الاستيلاء» على الكودونات الثلاثية، وهذا يبدو صحيحًا. فعلى سبيل المثال، فإن الـ ١٥ حمضًا أمينيًّا الأكثر احتمالًا أن يكون قد تمَّ تشفيرها بالشفرة المزدوجة القديمة استولت فيما بينها على ٥٣ من بين الكودونات الثلاثية الأربعة والستين المحتملة؛ أي بمعدل ٣٫٥ كودونات لكل حمض أميني. وعلى النقيض من هذا، فإن الأحماض الخمسة اللاحقة تَعيَّن عليها توزيع الكودونات الثمانية المتبقية فيما بينها، بمعدل ١٫٦ كودون فقط. وهذا يشابه ما يحدث حينما تقتنص الطيور المبكرة غذاءها من الديدان.

لذا فلنتفكَّرْ قليلًا في احتمال أن الشفرة كانت في بداية الأمر مزدوجة، وليست ثلاثية، شفرة لعدد إجمالي مقداره ١٥ حمضًا أمينيًّا (زائد كودون «توقيفي» واحد). هذه الشفرة القديمة يبدو أنها كانت حتمية بالكامل تقريبًا، بمعنى أنها يتم إملاؤها من قبل عوامل فيزيائية وكيميائية، وثمة استثناءات قليلة لهذه القواعد بأن يكون الحرف الأول متحالفًا مع المادة السابقة (الطليعية)، بينما يكون الحرف الثاني مرتبطًا بدرجة تقبُّل الحمض الأميني للماء. وثمة مجال قليل هنا لدور المصادفة؛ فلا تحرر من القواعد الفيزيائية.

إلا أن الحرف الثالث يُعَدُّ شيئًا مختلفًا؛ إذ يُوجَد قَدْرٌ كبير من المرونة المتعلقة بهذا الحرف، وثمة دور للمصادفة يمكن أن تلعبه، ومن ثم صار ممكنًا أن يعمل الانتقاء على تحسين الشفرة. هذا، على أي حال، كان الافتراض المتطرف الذي تقدَّمَ به اثنان من علماء الأحياء الجزيئية الإنجليز؛ وهما لورنس هيرست وستيفن فريلاند، في أواخر تسعينيات القرن العشرين. لقد صار الاثنان في بؤرة الاهتمام العلمي حين قارنا الشفرة الجينية بملايين من الشفرات العشوائية المنتجة بالكمبيوتر. وفكَّرا في مقدار الضرر الذي يمكن أن ينجم عن الطفرات الموضعية؛ إذ يزول أحد الحروف من مكانه ليحل محله حرف آخر. وتساءلا: أي شفرة يمكنها أن تقاوم هذه الطفرات بشكل أفضل، إما بالاحتفاظ بنفس الحمض الأميني بالضبط، وإما بإبداله بآخر مماثل؟ ووجدا أن الشفرة الجينية الحقيقية مقاومة للتغيير بشكل مذهل؛ فغالبًا ما تحافظ الطفرات الموضعية على تتابع الأحماض الأمينية، وإذا ما حدث تغيير ما فإنه يكون هناك مَيْل لأن يجيء حمض أميني ذو صلة فيزيائيًّا ليحل محل الحمض الأميني المتغير. وفي الواقع، أعلن هيرست وفريلاند أن الشفرة الجينية الطبيعية أفضل من مليون شفرة بديلة مولدة عشوائيًّا. ليس الأمر محض تعصب من طرف المهتمين بالشفرة الطبيعية، ولكن شفرتنا الجينية فريدة بحق. فلا يقتصر الأمر على أن الشفرة تقاوم التغيير، بل إنها أيضًا تعمل عن طريق تقييد العواقب الكارثية الناجمة عن التغيرات التي تحدث على تسريع عملية التطور؛ فمن الواضح أن الطفرات، إن لم تكن كارثية، فهي مفيدة على الأرجح.

وإذا نحَّيْنا فكرة التصميم غير الأرضي للشفرات جانبًا، فإن الطريقة الوحيدة التي قد يفكر فيها أحدنا لتفسير تحسين الشفرة هي عن طريق عمليات الانتقاء. وإذا كان الأمر كذلك فإن شفرة الحياة لا بد أن تكون قد تطورت. بالتأكيد، يظهر عدد الاختلافات الطفيفة في الشفرة «العامة» فيما بين البكتيريا، بعضها والبعض، والميتوكوندريا الخلوية

أن الشفرة يمكن أن تتطور، على الأقل تحت ظروف استثنائية، ولكنك قد تتساءل: كيف تتغير الشفرة دون التسبب في إزعاج كريك؟ والإجابة: إن هذا يحدث بشكل غير مترابط؛ أي في صورة حالات فردية. فإذا تم تشفير حمض أميني ما من قِبَل أربعة أو حتى ستة كودونات مختلفة، فإن بعضها يميل لأن يُستخدَم أكثر من غيره. والكودونات نادرة الاستخدام يمكن عمليًّا أن يُعاد تخصيصها لحمض أميني مختلف (وإن كان يُرجَّح أن يكون ذا صلة) دون عواقب وخيمة، وبذلك تتطور الشفرة.

إذن، بشكل إجمالي، تتحدث عبارة «شفرة داخل الكودونات» عن عملية فيزيائية، تكون في البداية مرتبطة بالتركيب الحيوي ومدى قابلية الأحماض الأمينية للذوبان، ثم فيما بعد ذلك بتمددها وتحسينها. والسؤال الآن هو: ما نوع العملية الفيزيائية التي بدأ الانتقاء يعمل على أساسها؟

الإجابة غير معروفة بشكل مؤكد، وتُوجَد إزاءها عوائق كئود. ومن أقدم تلك العوائق المعضلة العويصة الخاصة بالدي إن إيه والبروتينات. كانت المشكلة تتمثَّل في أن الدي إن إيه خامل تقريبًا بطبعه، ويحتاج إلى بروتينات محددة ليضاعف نفسه، فضلًا عن أمور أخرى. ومن الناحية الأخرى، لا تتحدد البروتينات بفعل الصدفة، بل تتطور بالانتقاء الطبيعي، ولكي يحدث ذلك لا بد أن يكون تركيبها متوارثًا ومتغيرًا. ولا تعمل البروتينات مثل قالبها المتوارَث، بل يتم تشفيرها مِنْ قِبَل الدي إن إيه؛ ومن ثم لا يمكن أن تتطور البروتينات بدون الدي إن إيه، وأيضًا لا يمكن أن يتطور الدي إن إيه بدون البروتينات. فإذا لم يكن ممكنًا لأيٍّ منهما أن يتطوَّر دون الآخر، فلا يمكن أن تبدأ عملية الانتقاء حينئذ.

ثم حدث في منتصف عقد الثمانينيات من القرن الماضي ذلك الاكتشاف المذهل الذي يتمثَّل في أن الآر إن إيه يعمل كعامل مساعد محفز. نادرًا ما يأخذ الآر إن إيه شكل اللولب المزدوج، ولكنه بدلًا من ذلك يأخذ شكل جزيئات أصغر حجمًا بأشكال معقدة تجعلها مناسبة للعمل كمواد محفزة. ومن ثم يكسر الآر إن إيه حلقة الدي إن إيه والبروتينات المفرغة. وفي «عالم الآر إن إيه» الافتراضي يقوم الآر إن إيه بدور كلٍّ من البروتينات والدي إن إيه، عاملًا كمادة محفزة لعملية تخليقه هو لنفسه، فضلًا عن تفاعلات أخرى كثيرة. وهكذا وجدنا فجأة أن لا حاجة لأن يكون تفسير الشفرة كله معتمدًا على الدي إن إيه، بل يمكن أن تكون الشفرة قد نتجت عن التفاعلات المباشرة للآر إن إيه مع البروتينات.

بدا هذا معقولًا بشكل جيد فيما يختص بكيفية أداء الخلايا الحديثة لعملها. ففي الخلايا في عصرنا هذا، لا تُوجَد تفاعلات مباشرة بين الدي إن إيه والأحماض الأمينية، ولكن أثناء عملية تخليق البروتين، يتم تحفيز الكثير من التفاعلات الأساسية بإنزيمات الآر إن إيه التي تُعرَف بالريبوزيمات (الإنزيمات الريبية). أما لفظ «عالم الآر إن إيه» فقد صاغه زميل لواطسون في جامعة هارفرد يُدعى والتر جلبرت ونُشِر في واحد من أكثر مقالات مجلة «نيتشر» اطلاعًا حتى الآن. وكان لهذه الفكرة تأثير رائع في هذا المجال، بينما أُعِيدَتْ صياغة التساؤل المتعلق بشفرة الحياة من عبارة «كيف يعمل الدي إن إيه على تشفير البروتينات؟» إلى «ما أنواع التفاعلات التي يجب أن تكون قد حدثت بين الآر إن إيه والأحماض الأمينية؟» إلا أن الإجابة كانت بعيدة عن الوضوح المطلوب.

وفي خضم الاهتمام المركَّز بعالم الآر إن إيه، ربما كان من العجيب أنْ حَدَثَ تجاهل كبير للخصائص المحفِّزة لِقطَع الآر إن إيه الأصغر حجمًا. فإذا كانت جزيئات الآر إن إيه الكبيرة يمكنها أن تحفِّز التفاعلات، فمن المرجَّح أن الفتات الأصغر حجمًا منها — أي «الحروف» المفردة أو أزواج «الحروف» — يمكنها أيضًا أن تحفز التفاعلات، وإن كان هذا يتم بشكل أقل شدة. وتوحي أبحاث حديثة أجراها عالم الكيمياء الحيوية الأمريكي الرائع هارولد موروفيتس، ومعه عالمة البيولوجيا الجزيئية شيلي كوبلي وعالم الفيزياء إريك سميث، بهذا الاحتمال بالضبط. قد لا تكون أفكارهم صحيحة، ولكني أعتقد أن هذا هو نوع النظرية الذي ينبغي أن نبحث فيه لتفسير أصل شفرة الحياة.

يفترض موروفيتس وزميلاه أن أزواج الحروف (التي تُسمَّى تقنيًّا «النيوكليوتيدات الثنائية») تعمل بالفعل كعوامل محفزة. وقد تصوَّروا نيوكليوتيدًا ثنائيًّا يرتبط بطليعة حمض أميني، مثل البيروفات، ويحفز عملية تحوله إلى حمض أميني. ويعتمد نوع الحمض الأميني الذي يتكوَّن على الحروف التي تتزاوج معًا في النيوكليوتيد الثنائي (مع اتباع قاعدة الشفرة داخل الكودونات التي ناقشناها من قبل). وباختصار نقول إن الموضع الأول يحدِّد نوع طليعة الحمض الأميني، ويحدِّد الثاني نمط عملية التحول. فإذا كان الحرفان هما UU على سبيل المثال، تترابط أجزاء البيروفات ويتحوَّل إلى حمض أميني كاره للماء بوضوح؛ وهو الليوسين. وقد دعم موروفيتس هذه الفكرة البسيطة الجميلة ببعض آليات التفاعل الماهرة؛ مما يجعلها على الأقل مقبولة، مع أنني أودُّ أن أرى في أنبوبة اختبار بعضَ الأدلة على أن التفاعلات المفترضة تحدث بالفعل.

ويحتاج الأمر إلى خطوتين أخريين لِنَصِل إلى شفرة ثلاثية من هنا، على الأقل مبدئيًّا، ولا تفترض هاتان الخطوتان أي شيء أكثر من عملية التزاوج العادية بين الحروف. ففي

الخطوة الأولى، يرتبط جزيء آر إن إيه بالنيوكليوتيد الثنائي ذي الحرفين عن طريق عملية تزاوج أساسية قياسية؛ وهي: G مع C، A مع U، وهكذا. وينتقل الحمض الأميني إلى الآر إن إيه الأكبر، الذي لكونه أكبر تكون لديه قوى جذب أقوى.[٦] ويكون الناتج هو آر إن إيه مرتبط بحمض أميني؛ يعتمد تمييز نوعه على الحروف التي كوَّنَت النيوكليوتيد الثنائي. ويُعتبَر، في واقع الأمر، نموذجًا أصليًّا من جزيئات كريك المهايئة، وهو آر إن إيه تم تحميله بالحمض الأميني «الصحيح».

وتعمل الخطوة النهائية على تحويل الشفرة ذات الحرفين إلى شفرة ثلاثية الأحرف، ويمكنها مرة أخرى ألا تعتمد على أكثر من القواعد القياسية للتزاوج بين جزيئات الآر إن إيه. فإذا كانت تلك التفاعلات تعمل بثلاثة أحرف أفضل مما تعمل بحرفين (ربما لأن التباعد حينئذٍ يكون أفضل، أو الارتباط أقوى)، فإننا حينئذٍ ننتقل بسهولة إلى الشفرة الثلاثية، وفيها يتحدد الحرفان الأولان بفعل قيود عملية التخليق، بينما يمكن أن يختلف الحرف الثالث في حدود ما، مُتِيحًا الفرصة لتحسين الشفرة في مرحلة تالية. وهنا أشك في أن مفهوم كريك الأصلي عن جزيئات الآر إن إيه، التي تستقر مثل خنازير دقيقة رضيعة ترضع من أثداء الخنزيرة الأم، قد يكون صحيحًا؛ إذ يمكن أن تدفع القيود المكانية جزيئات الآر إن إيه المتاخمة إلى تحديد معدل ثلاثة حروف في المتوسط. لاحظ أنه حتى الآن لا يُوجَد إطار للقراءة، ولا بروتينات، بل مجرد أحماض أمينية تتفاعل مع جزيئات الآر إن إيه. ولكن أساس الشفرة صار بالفعل في مكانه الصحيح، ويمكن إضافة أحماض أمينية إضافية في مرحلة تالية عن طريق قنص كودونات ثلاثية شاغرة.

يُعتبَر هذا السيناريو بكامله افتراضيًّا ومن المؤكد أنه حتى الآن لا تُوجَد سوى أدلة قليلة تدعمه. وأكبر ميزة له أنه يلقي الضوء على أصل الشفرة، آخذًا إيَّانا من مجرد التفكير في ارتباطات كيميائية بسيطة إلى وجود كودون ثلاثي بطريقة مقبولة ويمكن اختبارها. وحتى في هذه الحالة ربما تشعر أن هذا الأمر مقبول، لكن المشكلة أنه يعتمد بشدة على جزيئات الآر إن إيه، وكأنها شيء سهل المنال ينمو على الأشجار. ولهذا الأمر أتساءل: كيف ننتقل من مجرد ارتباطات كيميائية بسيطة إلى عملية الانتقاء للبروتينات؟ وكيف ننتقل من الآر إن إيه إلى الدي إن إيه؟ في هذا الصدد، ثمة إجابات قوية تدعمها اكتشافات مدهشة ظهرت في السنوات القليلة الماضية. ومما يثير الشعور بالرضا أن الاكتشافات الجديدة تتوافق بشكل رائع مع فكرة أن الحياة تطورت داخل الفوهات الحرمائية، وهو ما ورد ذكره في الفصل الأول.

السؤال الأول هو: من أين تأتي جميع جزيئات الآر إن إيه؟ فبالرغم من مرور عقدين من الأبحاث المكثفة في عالم الآر إن إيه، فإنه ندر أن وجه هذا السؤال بطريقة جادَّة. بل كان ثمة افتراض فكري غير معقول ولم يَقُلْه أحد، أن الآر إن إيه كان «يُوجَد على الدوام» داخل حساء بدائي وحسب.

لا أقصد الخداع هنا، ولكن هناك مشكلات معينة كثيرة في العلوم، ولا يمكن الإجابة عنها جميعًا دفعة واحدة. وتعتمد القدرة التفسيرية العجيبة لعالم الآر إن إيه على أمر محدد؛ ألا وهو الوجود الأصلي السابق للآر إن إيه. وبالنسبة لرواد عالم الآر إن إيه لم يكن من المهم أن يسألوا من أين جاء الآر إن إيه؛ بل كان السؤال الذي يوجه أبحاثهم هو: ما الذي يمكن أن يفعله؟ بالتأكيد، كان هناك آخرون مهتمون بعملية تخليق الآر إن إيه، ولكنهم كانوا منقسمين إلى فئات متجادلة على طول المدى، ومتناحرة فيما بينها حول افتراضاتهم المفضَّلة. فبعضهم يذهب إلى أنه ربما تمَّ تخليق الآر إن إيه في الفضاء الخارجي من مادة السيانيد، أو أنه ربما صُنِع هنا على ظهر الأرض حينما ضرب البرق غازات الميثان والنشادر، أو ربما تشكل على ذهب الحمقى في أحد البراكين. ولم تُقدِّم كل تلك السيناريوهات إلا القليل من النفع، بل عانت جميعًا نفس المشكلة الأساسية، وهي «مشكلة التركيز».

من الصعوبة بمكان صنع حروف الآر إن إيه المفردة (النيوكليوتيدات)، ولكنها ترتبط معًا في شكل بوليمر (جزيء آر إن إيه عادي) إذا كانت النيوكليوتيدات موجودة بتركيز عالٍ. فإذا كانت موجودة بكمية كبيرة فإنها، أي النيوكليوتيدات، تتكثف تلقائيًّا إلى سلاسل طويلة. ولكن إذا كان التركيز منخفضًا يحدث العكس؛ بمعنى أن يتكسر بوليمر الآر إن إيه إلى مُكوِّناته من النيوكليوتيدات. والمشكلة أن كل مرة يعمل فيها الآر إن إيه على تكرار نفسه، فإنه يستهلك المزيد من النيوكليوتيدات؛ مما يؤدي إلى خفض تركيزها. فإذا لم يتم تعويض كمية النيوكليوتيدات باستمرار وبمعدل أسرع من استهلاكها، فلن يستمر عالم الآر إن إيه في عمله بكل قدرته التفسيرية. لن يستمر أبدًا وفق هذا السيناريو. ومن ثم، فإن من كانوا يريدون إحراز بعض النتائج العلمية النافعة يتقبَّلون وجود الآر إن إيه كما هو دون تفسير.

وقد أحسنوا صنعًا؛ لأن الجواب الذي يحتاجونه لم يأتِ إلا بعد وقت طويل، وعلى نحوٍ دراميٍّ. من المؤكد أن الآر إن إيه لا ينمو على الأشجار، ولكنه يتكوَّن في الفوهات الحرمائية الطبيعية، أو الاصطناعية على الأقل. ففي بحثٍ نظريٍّ مهم في عام ٢٠٠٧،

أورد عالم جيوكيميائي نَشِطٌ يُدعى مايك راسل (ذكرناه في الفصل الأول) بالتعاون مع ديتر براون وزملائه في ألمانيا، أن النيوكليوتيدات يجب أن تتراكم حتى مستويات قصوى في تلك الفوهات. ويرتبط سبب ذلك بالتدرجات الحرارية القوية التي تنشأ هنالك. ارجع إلى الفصل الأول لتتذكَّر أن الفوهات الحرمائية القلوية مليئة بثقوب متصلة فيما بينها. وتُسبِّب التدرجات الحرارية نوعين من التيارات يدوران عَبْر تلك الثقوب؛ وهما: تيارات الحِمْل الحراري (كما يحدث في غلاية الشاي)، والانتشار الحراري (وهو انتقال الحرارة إلى مياه أكثر برودة). وهذان النوعان من التيارات الحرارية يعملان تدريجيًّا على ملء الثقوب السفلية بالكثير من الجزيئات الصغيرة، ومنها النيوكليوتيدات. وقد صنع أولئك الباحثون نظامًا حراريًّا مائيًّا اصطناعيًّا، وصل فيه تركيز النيوكليوتيدات إلى مستوى يزيد بمقدار آلاف، بل ملايين الأضعاف، عن مستواه الابتدائي. وهذه المستويات العالية يجب أن تؤدِّي بشكل كافٍ إلى تكثيف النيوكليوتيدات إلى سلاسل من الآر إن إيه أو الدي إن إيه. وكما استنتج الباحثون، فإن هذه الأحوال أو الشروط تُوفِّر «نقطة بدء من التركيز المرتفع تدفع عملية التطور الجزيئي للحياة».

ولكن هذا ليس كل ما يمكن أن تفعله الفوهات؛ فجزيئات الآر إن إيه أو الدي إن إيه الأكثر طولًا تتراكم نظريًّا إلى مستويات أعلى من النيوكليوتيدات المفردة؛ فأحجامها الأكبر تجعلها أكثر قابلية للتراكم في الثقوب. وإن جزيئات الدي إن إيه التي تتركب من ١٠٠ زوج قاعدي يُتوقَّع لها أن تتراكم إلى مستويات خيالية، قد تصل إلى مليون مليار مرة فوق مستوى التركيز الابتدائي، وهذه التركيزات العالية يجب مبدئيًّا أن تتيح حدوث جميع أنواع التفاعلات التي ناقشناها، مثل ربط جزيئات الآر إن إيه بعضها ببعض، وهكذا. بل وأفضل من هذا، فإن درجات الحرارة المتذبذبة (أي الدورانية الحرارية) تعزز تضاعف الآر إن إيه، بنفس الطريقة التي تحدث في التقنية المعملية العامة التي تُسمَّى «تفاعل البوليميراز المتسلسل». ففي هذا التفاعل تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى حل جزيئات الدي إن إيه؛ مما يُمكِّنها من أن تعمل كقالب، بينما يؤدي التكثيف في درجات الحرارة المنخفضة إلى إتاحة الفرصة لخيط الدي إن إيه المكمل لأن يتبلمر ويكون الناتج هو حدوث معدل مرتفع جدًّا من التضاعف.[٧]

وإذا أخذنا الأمرين معًا، فإن التدرجات الحرارية يجب أن تركز النيوكليوتيدات المفردة إلى مستويات قصوى في الفوهات؛ مما يعزز تكوُّن الآر إن إيه. ثم يجب على نفس هذه التدرجات أن تركز الآر إن إيه؛ مما يعزز التفاعلات الفيزيائية بين الجزيئات، وفي

النهاية يجب على درجات الحرارة المتذبذبة أن تعزز تضاعف الآر إن إيه. ومن الصعب أن تتخيَّل وضعًا أفضل من هذا لعالم الآر إن إيه البدائي.

والآن، ماذا عن سؤالنا الثاني: كيف ننتقل من عملية التضاعف لجزيئات الآر إن إيه، التي تتنافس فيما بينها، إلى منظومة أكثر دقة وتعقيدًا وفيها يبدأ الآر إن إيه في تشفير البروتينات؟ ونقول مجددًا إن الفوهات قد تحمل الإجابة عن هذا السؤال.

ضَعْ جزيئات الآر إن إيه في أنبوبة اختبار، مع المواد الخام والطاقة (ثلاثي فوسفات الأدينوسين) التي تحتاجها، وسوف تتضاعف. في الواقع، إنها لن تفعل هذا فحسب، بل لقد اكتشف عالم البيولوجيا الجزيئية سول سبيجلمان وآخرون في عقد الستينيات من القرن الماضي أن جزيئات الآر إن إيه سوف تتطوَّر. وعلى مدى أجيال من تجارب أنابيب الاختبار تزداد سرعة جزيئات الآر إن إيه في التضاعف؛ مما يجعلها في نهاية الأمر عالية الكفاءة بشدة، أي إنها «تتوحش» في كفاءتها. ووحش سبيجلمان هذا عبارة عن خيط متضاعف من الآر إن إيه عالي الخصوبة، يعمل على نحوٍ نَشِطٍ محموم في بيئة اصطناعية. ومما يثير العجب، أنه لا يهم من أين تبدأ؛ إذ يمكنك أن تبدأ بفيروس كامل أو بقطعة اصطناعية من الآر إن إيه. بل يمكنك أن تبدأ بخليط من النيوكليوتيدات مع إنزيم البوليميراز لربط ذلك الخليط معًا. وأيًّا كان ما تبدأ به ينتهي بك المآل إلى نفس «الوحش»، أي نفس خيط الآر إن إيه الذي يتضاعف بسعار وجنون، والذي بالكاد يصل طوله إلى خمسين حرفًا؛ وحش سبيجلمان. ويتكرر الأمر مرة تلو الأخرى بلا نهاية.

المهم في الأمر أن وحش سبيجلمان لا يصير أكثر تعقيدًا. ويرجع السبب في ضرورة ألا يزيد طوله عن خمسين حرفًا إلى أن هذا هو التتابع الارتباطي المناسب لإنزيم التضاعف، الذي بدونه لا يمكن أن يحقِّق خيطُ الآر إن إيه تضاعُفَه المطلوب. في واقع الأمر، يهتم الآر إن إيه بنفسه فقط ولا يستطيع أن يُحقِّق درجة التعقيد المطلوبة في حالة المحلول؛ فكيف إذن ولماذا يبدأ الآر إن إيه في تشفير البروتينات، على حساب سرعة تضاعفه الذاتي؟ إن الطريق الوحيد لكسر هذه الحلقة المفرغة هو أن يحدث الانتقاء عند «مستوى أعلى»؛ حتى يصير الآر إن إيه جزءًا من كيان أكبر، الذي يُعَدُّ الآن وحدة الانتقاء، وهي الخلية على سبيل المثال. المشكلة أن جميع الخلايا العضوية شديدة التعقيد لدرجة أنها لا يمكنها أن تنبثق إلى الوجود فجأة دون أن تتطوَّر، بمعنى أنه يجب أن يحدث انتقاء للسلالات التي تكوِّن الخلية، وليس انتقاء لسرعة تضاعف الآر إن إيه. هذه معضلة عويصة، يتعذَّر تجنُّبها تمامًا مثل حلقة الدي إن إيه والبروتينات المفرغة، وإن كانت أقل شهرة.

رأينا أن الآر إن إيه يكسر حلقة الدي إن إيه والبروتينات المفرغة بشكل رائع، ولكن ما الذي يكسر حلقة الانتقاء المفرغة؟ تتمثل الإجابة الظاهرة أمام أعيننا في الخلايا غير العضوية الجاهزة المتكونة في الفوهات الحرمائية؛ فهذه الخلايا تكون في نفس حجم الخلايا العضوية تقريبًا وتتكوَّن طوال الوقت في الفوهات النشطة. ومن ثم، إذا كانت مكونات خليةٍ ما صالحة لتجديد المواد الخام اللازمة لمضاعفة أنفسها، فإن الخلية تبدأ في مضاعفة نفسها، فتتبرعم لتكوِّن خلايا غير عضوية جديدة. وعلى النقيض من هذا، فإن جزيئات الآر إن إيه «الأنانية» التي تضاعف أنفسها بأسرع ما يمكن تبدأ في التدهور؛ إذ تكون عاجزة عن تجديد المواد الخام اللازمة لاستمرار تضاعفها ذاتيًّا.

بعبارة أخرى، في بيئة الفوهات المذكورة ينتقل الانتقاء تدريجيًّا من مسألة السرعة التضاعفية لجزيئات الآر إن إيه المفردة إلى مسألة «الأيض» الكلي للخلايا، التي تعمل كوحدات مفردة. وتُعتبَر البروتينات، دون سواها، هي المتحكمة في الأيض. ومما لا مفر منه أنها في نهاية الأمر تحل محل الآر إن إيه. ولكن بطبيعة الحال، فإن البروتينات لا تأتي إلى الوجود في الحال، بل من المرجح أن المعادن والنيوكليوتيدات، وجزيئات الآر إن إيه، والأحماض الأمينية والمركبات الجزيئية (الأحماض الأمينية التي ترتبط بالآر إن إيه على سبيل المثال) كلها تسهم في إنتاج نموذج أصلي من الأيض. والفكرة هنا هي أن ما بدأ على صورة ارتباطات بسيطة بين الجزيئات، صار في عالم الخلايا المتكاثرة طبيعيًّا هذا انتقاءً للقدرة على إعادة إنتاج محتويات الخلايا ككلٍّ. لقد صار الأمر حينئذٍ انتقاءً للكفاءة الذاتية، وفي نهاية الأمر، للوجود المستقل نفسه. ومما يثير التعجب أننا نجد في الوجود المستقل للخلايا اليوم مفتاحنا النهائي لِلُغْز أصلِ الدي إن إيه ذاته.

يُوجَد فيما بين البكتيريا شق عميق. وسوف ندرك أهمية هذا الشق الكبيرة لتطورنا نحن أنفسنا في الفصل الرابع. أما الآن، فسوف نكتفي بتدبر تبعات ذلك على أصل الدي إن إيه؛ تلك التبعات العميقة في حد ذاتها بما يكفي. يُوجَد هذا الشق بين ما يُسمَّى البكتيريا الحقيقية وبين مجموعة ثانية تبدو مماثلة تقريبًا للمجموعة الأولى. تُعرَف هذه المجموعة الثانية باسم البكتيريا العتيقة، أو «العتائق» اختصارًا. واسمها مشتق من الفكرة القائلة إنها قديمة بدائية عتيقة، وإن كان يندر أن يعتقد أحد من الناس اليوم أنَّ تلك العتائق أقدم من البكتيريا الحقيقية.

في الواقع، ساهم الحظُّ في اكتشاف أن كلتا المجموعتين من البكتيريا، الحقيقية والعتائق، قد نشأتا من نفس المنشأ الحراري المائي. فلا يُوجَد شيء آخر تقريبًا يمكنه

أن يُفسِّر حقيقة أنهما تشتركان في نفس الشفرة الجينية، فضلًا عن تفاصيل كثيرة في تخليق البروتينات. ولكن يبدو أنهما لم تتعلما أن تُضاعِفا الدي إن إيه الذي لديهما إلا في وقت لاحِقٍ، وبشكل مستقل تمامًا. فمع أن الدي إن إيه والشفرة الجينية قد تطوَّرا مرة واحدة، فإن عملية تضاعف الدي إن إيه — وهي الآلية الفيزيائية للوراثة في جميع الخلايا الحية — يبدو أنها تطورت مرتين.

لو أن ذلك الزعم صدر عمَّن هو أقل شأنًا من يوجين كونين — المتخصص في علم الوراثة، وهو أمريكي وُلِد في روسيا، ويتصف بالذكاء والدقة والاهتمام بالحسابات والتقديرات، ويعمل في هيئة المعاهد القومية للصحة في الولايات المتحدة — لشككت فيه. إن كونين وزملاءه لم يقصدوا من وراء جهدهم أن يثبتوا مفهومًا ثوريًّا، بل اكتشفا ذلك الأمر — الذي سنذكره حالًا — بالمصادفة أثناء إجرائهم لمسح استقصائي منظم عن عملية تضاعف الدي إن إيه في البكتيريا والعتائق؛ إذ وجد كونين وزملاؤه عن طريق مقارنات تفصيلية للتتابع الجيني أن البكتيريا والعتائق تشتركان بشكل واسع في نفس آليات تخليق البروتينات. على سبيل المثال، الطريقة التي تتم بها قراءة الدي إن إيه لتحويله إلى آر إن إيه، ثم تتم ترجمة الآر إن إيه إلى بروتينات متماثلة في البكتيريا والعتائق، اللتين تستخدمان إنزيمات من الواضح (من خلال تتابعهما الجيني) أنها قد وُرثت عن سلف مشترك. إلا أن هذا الأمر لا ينطبق على الإنزيمات اللازمة لعملية تضاعف الدي إن إيه؛ فأغلبها لا يُعتبَر مشتركًا بالمرة. وهذه الحالة المثيرة للفضول يمكن تفسيرها بمجرد اختلافهما العميق، ولكن يبرز هنا سؤال: لماذا لم يؤدِّ التفاوت العميق بين عمليتَيْ نسخ الدي إن إيه وترجمته إلى حالة من عدم التماثل بينهما بشكل كامل؟ وأبسط تفسير لهذا هو الافتراض الثوري الذي أبداه كونين؛ وهو: إن عملية تضاعُف الدي إن إيه قد تطوَّرت مرتين؛ مرة في العتائق، ومرة في البكتيريا.[8]

لا بد أن مثل هذا الزعم بدا خياليًّا للكثيرين، ولكن بالنسبة لرجل ألمعي عنيد، ولكن بلطف، من تكساس ويعمل في ألمانيا، كان هذا هو المطلوب تمامًا. ذلك الرجل هو الكيميائي الحيوي بيل مارتن، الذي مَرَّ بنا في الفصل الأول، وكان قد شكَّل فريقًا مع مايك راسل لاستكشاف أصول الكيمياء الحيوية في الفوهات الحرمائية. واجه الرجلان الآراء التقليدية في عام ٢٠٠٣، وكتبا افتراضهما الشخصي قائلين إن السلف المشترك للبكتيريا والعتائق لم يكن كائنًا حُرَّ المعيشة إطلاقًا، ولكنه كان كائنًا متضاعفًا رديء النوع، حبيسًا في الصخر المسامي، لم يخرج عن نطاق الخلايا المعدنية التي تملأ الفوهات

الحرمائية. ولكي يدعم مارتن وراسل آراءهما أصدرا قائمة بالفروق الشديدة التي بين البكتيريا والعتائق. وبوجه خاص، فإن الأغشية والجُدُر الخلوية تختلف تمامًا فيما بينهما؛ بما يوحي بأن المجموعتين قد انبثقتا بشكل مستقل من نفس المناطق الصخرية. كان افتراضهما هذا ثوريًّا في نظر الكثيرين، ولكن كونين اعتبره متوافقًا مع ملاحظاته كما يناسب القفاز اليدين.

ولم يلبث مارتن وكونين أن انضمَّا معًا؛ ليفكرا معًا ويدرسا أصل الجينات والجينومات للكائنات الدقيقة في الفوهات الحرمائية، وتمَّ نشر أفكارهما المثيرة عن هذا الموضوع في عام ٢٠٠٥. وقد افترض الاثنان أن «دورة حياة» الخلايا المعدنية ربما كانت تشابه الفيروسات القهقرية الحديثة مثل فيروس نقص المناعة البشري؛ إذ إن لدى الفيروسات القهقرية جينومًا دقيقًا، ويتم تشفيره بالآر إن إيه وليس الدي إن إيه. وحينما تغزو تلك الفيروساتُ خليةً ما فإنها تنسخ الآر إن إيه الذي لديها إلى دي إن إيه مستخدمةً إنزيمًا يُسمَّى «إنزيم النسخ العكسي». يتم إدخال الدي إن إيه الجديد أولًا إلى جينوم العائل، ثم تتم قراءته مع الجينات الخاصة بخلية العائل. ومن ثم، حين يعمل الفيروس على صنع نسخ متعددة من نفسه، فإنه يعمل من منطلق الدي إن إيه؛ ولكن بينما يقوم بتجميع نفسه استعدادًا للجيل التالي فإنه يعتمد على الآر إن إيه لينقل المعلومات الوراثية. والملاحظ أن ما ينقصه هو قدرته على تضاعف الدي إن إيه، الذي يُعتَبَر عملية مرهقة تحتاج إلى عدد من الإنزيمات.

هناك ميزات وعيوب في دورة الحياة تلك. الميزة الكبرى هي السرعة؛ فبسيطرة الفيروسات القهقرية على آليات خلية العائل لتحويل الدي إن إيه إلى آر إن إيه، وترجمة الآر إن إيه إلى بروتينات، تُخلِّص تلك الفيروساتُ أنفسَها من الحاجة إلى وجود عدد كبير من الجينات؛ ومن ثم تُوفِّر على أنفسها قدرًا كبيرًا من الوقت والمشقة. والعيب الأكبر هو أنها تعتمد بالكامل على الخلايا المناسبة لبقائها. وثمة عيب آخر أقل وضوحًا، وهو أن الآر إن إيه فقير في تخزين المعلومات بالمقارنة بالدي إن إيه وهو أقل استقرارًا من الناحية الكيميائية، بمعنى أنه أكثر قابلية للتفاعل من الدي إن إيه. وتلك، على أي حال، الكيفية التي يحفز بها الآر إن إيه التفاعلات الكيميائية الحيوية. ولكن هذه التفاعلية تعني أن جينومات الآر إن إيه الكبيرة تكون غير مستقرة ومُعرَّضة للتحلل؛ مما يفرض عليها حدًّا أقصى للحجم أقل مما تحتاجه لوجودها المستقل. وفي الواقع يُعتَبَر الفيروس القهقري مساويًا — تقريبًا — في درجة تعقُّده بالفعل لأي كيان يتم تشفيره بالآر إن إيه.

ولكن هذا لا ينطبق على الخلايا المعدنية، فإن لديها ميزتين؛ مما يتيح الفرصة لنشوء صور من الحياة أكثر تعقيدًا. الميزة الأولى هي أن الكثير من الخصائص المطلوبة للوجود المستقل يتم تقديمه مجانًا في الفوهات الحرمائية؛ مما يعطي الخلايا دفعة قوية منذ البداية؛ إذ تُقدِّم الخلايا المعدنية المتكاثرة بالفعل الأغشية التي تحيط بها، والطاقة، وهكذا. ومن ثم؛ فمن المنطقي أن يكون للآر إن إيه ذاتي التضاعف الذي يستوطن تلك الفوهات سمات فيروسية بالفعل. الميزة الأخرى هي أن «جحافل» الآر إن إيه تختلط وتتوافق معًا من خلال الخلايا المترابطة؛ وهكذا فإن المجموعات التي «تتعاون» فيما بينها جيدًا يمكن انتقاؤها معًا إذا كانت تنتشر في انسجام لكي تستوطن خلايا حديثة التكوين.

ومن ثم تخيَّلَ مارتن وكونين جحافل من جزيئات الآر إن إيه وهي تنبثق في الخلايا المعدنية، وكل واحد من الآر إن إيه يُشفِّر عددًا من الجينات ذات الصلة. عيب هذا النسق، بالطبع، هو أن جحافل الآر إن إيه ستكون مُعرَّضة لأن تختلط مجددًا في مجموعات مختلفة وقد تكون غير مناسبة. والخلية التي يتقرر لها أن تضم «الجينوم» الخاص بها معًا عن طريق تحويل مجموعة من جزيئات الآر إن إيه المتعاونة إلى جزيء دي إن إيه واحد، يُتوقَّع منها أن تحتفظ بجميع ميزاتها. وحينئذ يكون تضاعفها مماثلًا للفيروس القهقري، ويتم تحويل الدي إن إيه الخاص بها إلى حشد من جزيئات الآر إن إيه، التي تغزو الخلايا المجاورة، مُكسِبةً إياها نفس القدرة على تخزين المعلومات في بنك الدي إن إيه. وتكون كل «دفعة» من جزيئات الآر إن إيه قد خرجت توًّا، من البنك، ومن ثم تكون أقل قابلية للتشوه بالأخطاء.

والسؤال الآن: ما درجة الصعوبة التي جابهت الخلايا المعدنية لكي «تخترع» الدي إن إيه في تلك الأحوال؟ الأمر ليس شديد الصعوبة، وربما كان أسهل بكثير من «اختراع» منظومة كاملة من عملية تضاعف الدي إن إيه (عوضًا عن الآر إن إيه). يُوجَد فرقان كيميائيان بسيطان فقط بين الآر إن إيه والدي إن إيه، ولكن الاثنين معًا يُحدثان فارقًا بنيويًّا هائلًا؛ وهو الفارق بين جزيئات الآر إن إيه الملتفة المحفزة، والدي إن إيه ذي شكل اللولب المزدوج الأيقوني (وهو الشكل الذي تنبأ به عفويًّا كلٌّ من كريك وواطسون وذكراه في بحثهما الذي نُشِرَ في مجلة «نيتشر» عام ١٩٥٣).[٩] وسيكون من الصعب إيقاف حدوث التغييرين — الآتي ذكرهما — في الفوهات الحرمائية بشكل تلقائي. أول هذين التغييرين هو إزالة ذرة أكسجين واحدة من جزيء الآر إن إيه (الحمض الريبوزي

النووي) للحصول على الدي إن إيه (الحمض النووي الريبوزي المنقوص الأكسجين). لا تزال آلية ذلك تجري اليوم على نوع المواد الوسيطة المتفاعلة (تُعتبَر جذورًا حرة من الناحية التقنية) الموجود في الفوهات الحرمائية. والتغيير أو الفارق الآخر هو إضافة مجموعة ميثيل CH_3 إلى حرف اليوراسيل للحصول على الثايمين. ونقول مجددًا إن مجموعات الميثيل هي «جذور» حرة متفاعلة من غاز الميثان، تكثر في تلك الفوهات القلوية.

وهكذا، فإنَّ صُنْع الدي إن إيه يُعتبَر سهلًا نسبيًّا؛ فهو يتكوَّن تلقائيًّا في الفوهات الحرمائية مثل الآر إن إيه (وأقصد تكوُّنه من مواد سابقة بسيطة، وهي عملية يتم تحفيزها بفعل بعض المعادن والنيوكليوتيدات والأحماض الأمينية، وهكذا). ولكن ثمة عمل بارع أكثر صعوبة قليلًا، وهو الاحتفاظ بالرسالة التي تمَّ تشفيرها؛ بمعنى صنع نسخة مطابقة تمامًا من تتابع الحروف في الآر إن إيه في شكل دي إن إيه. هذه أيضًا ليست عملية شديدة الصعوبة؛ فتحوُّل الآر إن إيه إلى الدي إن إيه يتطلَّب إنزيمًا واحدًا؛ وهو إنزيم النسخ العكسي الذي تستخدمه الفيروسات القهقرية اليوم، مثل فيروس نقص المناعة البشري. فكم هو عجيب أن ذلك الإنزيم الوحيد الذي «يحطم» الركيزة الأساسية للبيولوجيا الجزيئية — وهي عملية تحوُّل الدي إن إيه إلى الآر إن إيه ومنها إلى بروتين — هو نفسه الإنزيم الذي حوَّل صخرًا مساميًّا مليئًا بالآر إن إيه الفيروسي إلى صورة الحياة التي نعرفها اليوم! ربما نحن مدينون بنشوء الخلايا الحية لتلك الفيروسات القهقرية المتواضعة.

لا يزال هناك الكثير في هذه القصة لم أَقُلْه بعد، وكثير من الأحاجي والألغاز التي أغفلتُها في محاولتي لإعادة بناء قصة تكون منطقية، بالنسبة لي على الأقل. ولا يمكنني أن أدَّعي أن جميع الأدلة التي ناقشناها قطعية، أو أنها أكثر من مجرد دلالات على الماضي السحيق. إلا أنها دلالات أصيلة، يتعيَّن على أي نظرية تثبت صحتها أن تُفسِّرها. هناك أنماط بالفعل في شفرة الحياة، وهي أنماط تفرض إعمال كلٍّ من علم الكيمياء وعملية الانتقاء الطبيعي. تعمل التيارات الحرارية في الفوهات الموجودة في عمق المحيط حقًّا على تركيز النيوكليوتيدات والآر إن إيه والدي إن إيه، مُحوِّلة الخلايا المعدنية التي تموج بها إلى عالم مثالي من الآر إن إيه. وهناك حقًّا فروق عميقة بين العتائق والبكتيريا، وهي فروق لا يمكن تفسيرها بشكل اعتباطي، وهي فروق توضِّح بالتأكيد أن الحياة بدأت بدورة حياة فيروسية قهقرية.

إنني أشعر بالإثارة الحقيقية حينما أفكر أن القصة التي حللنا خيوطها هنا يُرجَّح أن تكون صحيحة، ولكن هناك شيء واحد يجعل الشك يعتمل في عقلي؛ وهو النتيجة التي توصلنا إليها وتقضي بأن الحياة الخلوية انبثقت مرتين من تلك الفوهات في عمق المحيط. فهل أصابت جزيئات الآر إن إيه الفوهات المجاورة لها بالعدوى، ثم سيطرت في نهاية الأمر على أجزاء كبيرة من المحيط، متيحة الفرصة لتفعيل عملية الانتقاء على نطاق عالمي؟ أم هل كان ثمة شيء متفرد ما فيما يتعلق بمنظومة معينة من تلك الفوهات، التي أدت ظروفها غير النمطية إلى نشوء كلٍّ من العتائق والبكتيريا؟ قد لا نعرف الجواب طوال حياتنا؛ ولكن الدور الذي تلعبه الصدفة والضرورة يجب أن يجعل كل إنسان منا يتوقف برهة من أجل التفكير.

الفصل الثالث

عملية البناء الضوئي

نتاج تأثير الشمس

تخيَّلْ عالمًا لا تحدث فيه عملية البناء الضوئي. بادئ ذي بدء، لن يكون أخضر اللون. إن كوكبنا الزمردي يعكس روعة النباتات والطحالب وجمالها؛ بما تتميَّز به من أصباغ طبيعية خضراء تمتصُّ الضوء لإجراء عملية البناء الضوئي. وأول تلك الأصباغ هو محول الطاقة الرائع المسمَّى الكلوروفيل، الذي يمتص أشعة الضوء ويُحوِّلها إلى دفقة من الطاقة الكيميائية؛ مما يتيح الحياة لكلٍّ من النبات والحيوان.

من المُرجَّح أن العالم، بغير تلك العملية، لن يكون حتى أزرق اللون؛ إذ إن زرقة السماء والبحار والمحيطات تعتمد على صفاء السماء والمياه، التي تُنقَّى من الغيوم والغبار بفعل القدرة التطهيرية للأكسجين. ودون البناء الضوئي لن يكون لدينا أكسجين حر.

وفي واقع الأمر، قد لا يكون في حالتنا هذه ثمة محيطات كذلك؛ فبدون الأكسجين لا يُوجَد أوزون، وبدون الأوزون لن يكون هناك إلا القليل ليحدَّ من القوة اللافحة للأشعة فوق البنفسجية. هذه الأشعة نفسها تعمل على تحليل الماء إلى شقيه: الأكسجين، والهيدروجين. فأما الأكسجين فإنه يتكوَّن ببطء ولا يتراكم في الهواء، بل إنه يتفاعل مع الحديد في الصخور، مُحوِّلًا إياها إلى لون أحمر ضارب إلى اللون البني. وأما الهيدروجين — أخفُّ الغازات — فإنه يفلت من أَسْر الجاذبية، وينسلُّ إلى الفضاء. قد تكون العملية بطيئة، ولكنها أيضًا تتم باستمرار بلا هوادة وكأن المحيطات تنزف إلى الفضاء. إن الإشعاع فوق البنفسجي حَرَمَ كوكب الزهرة من محيطاته، وربما حَرَمَ كوكب المريخ منها أيضًا.

وهكذا فإننا لا نحتاج للكثير من الخيال لكي نتصوَّر عالمًا خاليًا من البناء الضوئي؛ إذ سيبدو إلى حدٍّ بعيد مثل المريخ: مكان مُتَرَّب أحمر اللون؛ بغير محيطات من المياه، وبدون أي آثار واضحة تنم عن الحياة. تُوجَد بالطبع صور من الحياة في غياب البناء الضوئي، ويبحث العديد من علماء البيولوجيا الفضائية عنها على كوكب المريخ. ولكن حتى إن وجدوا قليلًا من البكتيريا مختفية تحت سطحه، أو مدفونة في كتلة جليدية، فإن الكوكب نفسه يُعتبَر ميتًا. إنه في حالة من شبه التوازن — فلا حياة حقيقية ولا موت تامًّا — وهي علامة مؤكدة على الجمود.

إن الأكسجين هو مفتاح الحياة على الكواكب. ومع أن الأكسجين لا يزيد عن كونه منتجًا ثانويًّا مهملًا لعملية البناء الضوئي، فإنه حقًّا هو الجزيء الذي تكوَّن منه العالم بصورته الحالية. يتكوَّن الأكسجين سريعًا وبكثافة من عملية البناء الضوئي لدرجة أنه يتغلب على قدرة الكوكب على ابتلاعه. وفي نهاية الأمر يتأكسد كل التراب، وكل الحديد في الصخور، وكل الكبريت في البخار والميثان في الهواء، وأي شيء يمكن أَكْسَدَتُه، ويستمر الأكسجين الحر في التدفق في الهواء والمحيطات. علاوة على هذا، فإن الأكسجين يُوقِف ضياع الماء من كوكبنا؛ فحين ينطلق الهيدروجين من الماء، فإنه يُضطر إلى الاتحاد بالمزيد من الأكسجين قبل أن يجد طريقه إلى الفضاء؛ فهو يتفاعل سريعًا ليكوِّن الماء مجددًا، الذي يصبح مطرًا يسقط مرة أخرى من السماء، فيعوِّض ما يُفقَد بالبخر من مياه المحيطات. وحينما يتراكم الأكسجين في الهواء، يتكوَّن درع من غاز الأوزون، وذلك يحدُّ من الشدة اللافحة للأشعة فوق البنفسجية ويجعل العالم أكثر صلاحية للحياة.

لا يقتصر دور الأكسجين على إنقاذ الحياة على كوكبنا وحسب، بل إنه ينشر الحياة على نطاق واسع. صحيحٌ أن البكتيريا تستطيع أن تحيا بشكل جيد تمامًا بغير الأكسجين؛ فلديها مهارة لا تُضاهى في الكيمياء الكهربية، وهي قادرة على أن تجعل جميع الجزيئات تقريبًا تتفاعل معًا لتجني القليل من الطاقة. إلا أن الناتج الإجمالي للطاقة الذي يمكن اشتقاقه من التخمر، أو عن طريق تفعيل جزيئين — مثل الميثان والكبريت — معًا، يُعتبَر كمًّا مهملًا إذا قُورِن بقوة التنفس الهوائي؛ أي بالتحديد: حرق الطعام بالأكسجين. بمعنى أكسدته بالكامل إلى ثاني أكسيد الكربون وبخار ماء. ولا شيء آخر يمكنه تقديم الطاقة المطلوبة كوقود للوفاء باحتياجات حياة الكائنات متعددة الخلايا. تعتمد الحيوانات والنباتات جميعها على الأكسجين لجزء على الأقل من دورة حياتها، والاستثناء الوحيد الذي أعرفه هو دودة خيطية ميكروسكوبية (متعددة الخلايا)،

تعيش في الأعماق الراكدة الخالية من الأكسجين في البحر الأسود. ومن ثم أقول إن العالم الخالي من الأكسجين يكون ميكروسكوبيًّا، على الأقل على مستوى الكائنات المفردة.

ويسهم الأكسجين في كِبَر حجم الكائنات بصور أخرى أيضًا. فكِّر في السلسلة الغذائية؛ إذ تستقر المفترسات على قمتها، وهذه تأكل الحيوانات الأصغر حجمًا، التي بدورها قد تأكل الحشرات التي تأكل حشرات أصغر، والتي بدورها تعيش على أكل الفطريات أو أوراق النباتات. ليس من العجيب أن نجد في شبكة غذائية خمسة أو ستة مستويات من الكائنات. وفي كل خطوة يحدث إهدار لقدر من الطاقة، فلا تُوجَد صورة من صور التنفس تبلغ درجة كفاءتها مائة بالمائة. وفي الواقع، تبلغ نسبة كفاءة التنفُّس الهوائي حوالي ٤٠ بالمائة، بينما تقل كفاءة أغلب صور التنفس الأخرى (باستخدام الحديد أو الكبريت، على سبيل المثال، بدلًا من الأكسجين) عن ١٠ بالمائة. هذا يعني أنه عند عدم استخدام الأكسجين، تتضاءل الطاقة المتاحة إلى ١ بالمائة عن مستواها الابتدائي في غضون مستويين فقط، بينما تحتاج ستة مستويات عند استخدام الأكسجين حتى تصل إلى نفس النقطة. وهذا يعني بدوره أن السلاسل الغذائية الطويلة لا تكون ملائمة إلا بالتنفس الهوائي. وتعني اقتصادية السلسلة الغذائية أن المفترسات يمكن أن تقوم بدورها بالقدر المطلوب في عالم مؤكسج، غير أن عملية الافتراس بوصفها نمط حياة لن تؤتي ثمارها بغير الأكسجين.

إن عملية الافتراس تقتضي تصاعدًا في الحجم، بطبيعة الحال، ومن ثم تفرض سباق تسلح بين المفترس والفريسة. فالدروع والأغلفة الصلبة تصد الأنياب، والحيل التمويهية تخدع أبصار الأعداء، وحجم الحيوان يبثُّ الرهبة في قلب كلٍّ من الصياد والفريسة. ففي وجود الأكسجين، إذن، يكون للافتراس فائدة، وفي وجود الافتراس يكون لحجم الحيوان فائدة. ومن ثم فإن الأكسجين لا يجعل الحيوانات أكبر حجمًا فحسب، وإنما يجعل وجودها أكثر ترجيحًا منذ البداية.

الأكسجين يساعد أيضًا على بناء أجساد الحيوانات. يُسمَّى البروتين الذي يكسب الحيوان قُوَّتَه المرنة الكولاجين، وهو البروتين الرئيسي في جميع الأنسجة الضامة، سواء أكانت متكلسة في العظام والأسنان والدروع، أو غير مُغلَّفة بمواد صلبة في الأربطة والأوتار والغضاريف والجلد. ويُعَدُّ الكولاجين أكثر البروتينات وفرة في الثدييات، مُشكِّلًا نسبةً مدهشةً قَدْرُها حوالي ٢٥ بالمائة من البروتين الكلي للحيوان. وخارج نطاق الحيوانات الفقارية، يُعتَبَر الكولاجين مُكوِّنًا مهمًّا في الأغلفة الصلبة للأجسام، والبشرة، ودروع

الظهر والأنسجة الليفية من جميع الأنواع؛ فكأنه بمنزلة «الشريط الرابط والغراء» بالنسبة لعالم الحيوان بأكمله. ويتكوَّن الكولاجين من وحدات بنائية غير عادية، وهي تحتاج إلى أكسجين حر لتكون روابط متقاطعة بين الألياف البروتينية المتجاورة؛ مما يعطي البنية ككلٍّ قوةً توترية عالية. والاحتياج إلى الأكسجين الحر يعني أن الحيوانات الكبيرة، التي تحميها أغلفة صلبة أو هياكل قوية لم يكن بإمكانها أن تنشأ وتتطور إلا حينما كانت مستويات الأكسجين الهوائي عالية بدرجة تكفي لدعم إنتاج الكولاجين، وهو عامل ربما أدَّى إلى الظهور السريع المباغت للحيوانات الكبيرة في سجل الحفريات في بداية العصر الكمبري، الذي يرجع إلى حوالي ٥٥٠ مليون سنة خلَتْ، بعد ارتفاع نسبة الأكسجين في الغلاف الجوي للأرض بوقت قصير.

قد لا تبدو الحاجة للأكسجين لصنع الكولاجين أكثر من مجرد حادثة عَرَضية، فإن لم يكن الكولاجين فلماذا لم يكن شيء آخر لا يحتاج إلى أكسجين حر؟ فهل الأكسجين ضروري لإكساب القوة أم أنه مجرد مكوِّن عشوائي تصادَفَ دخوله في تلك العملية ثم بقي للأبد جزءًا منها؟ لا نعرف على وجه التحقيق، ولكن من المدهش أن النباتات الراقية أيضًا تحتاج إلى الأكسجين الحر لتتكون مادتها البنائية الداعمة، في شكل مادة بوليمرية شديدة القوة تُسمَّى اللجنين، التي تُكسِب الخشب قوته المرنة القابلة للانثناء. تتكوَّن مادة اللجنين بطريقة تبدو كالمصادفة كيميائيًّا، مستخدمة الأكسجين الحر في تكوين روابط متقاطعة قوية بين سلاسل من تلك المادة؛ مما يجعل من الصعب جدًّا كسرها، ولهذا نجد الخشب قويًّا جدًّا ولا يتعطَّن إلا بعد وقت طويل جدًّا. ولو أزلت اللجنين من الأشجار — وهي فكرة جرَّبَها بعض القائمين على صناعة الورق؛ إذ احتاجوا أن يزيلوه بصعوبة من لب الخشب لصنع الورق — فستسقط الأشجار على الأرض، غير قادرة على الحفاظ على كيانها كأشجار ولا تحتمل حتى أخف الأنسام.

وهكذا، بغير الأكسجين لم تكن تُوجَد حيوانات ولا نباتات كبيرة، ولا افتراس، ولا سماء زرقاء، وربما لم تكن تُوجَد محيطات أيضًا، ومن المرجح ألا يكون على الأرض إلا التراب والبكتيريا. لا ريب أن الأكسجين هو أثمن منتج ثانوي مهمل يمكن تخيُّله في العالم، إلا أنه ليس مجرد منتج ثانوي وحسب، ولكنه أيضًا يُعتبَر غير مرجح النشوء. فمن المتصوَّر أن عملية البناء الضوئي كان من الممكن أن تنشأ هنا على الأرض، أو على كوكب المريخ أو أي مكان آخر في الكون دون إنتاج أي أكسجين حر على الإطلاق. وفي هذه الحالة، كانت الحياة — بصفة مؤكدة تقريبًا — ستنحصر في درجة تعقيدها عند

مستوى البكتيريا، ولم يكن الإنسان ليعيش على ظهر الأرض، وكانت الأرض ستظل عالمًا يعج بالبكتيريا.

هناك سبب يمنع الأكسجين من أن يتراكم في الهواء، وهو التنفس. فالبناء الضوئي والتنفس عمليتان متعادلتان ومتضادتان في الاتجاه. ففي النبات تقوم عملية البناء الضوئي بصنع جزيئات عضوية من جزيئين بسيطين هما ثاني أكسيد الكربون والماء، مستخدمة ضوء الشمس للإمداد بالطاقة المطلوبة. أما التنفس فيفعل العكس تمامًا؛ فحينما نحرق جزيئات عضوية (في الطعام) فإننا نُطلِق ثاني أكسيد الكربون والماء اللذين يَعُودان إلى الهواء، وتنطلق في هذه العملية طاقة، وهي التي تبثُّ القوة في حياتنا. فكل طاقتنا تعود إلى حزمة من ضوء الشمس وصلت إلى طعامنا واختُزِنَتْ فيه.

تسير عمليتا البناء الضوئي والتنفس في اتجاهين متضادين، ولا يقتصر هذا على التفاصيل الكيميائية لكلٍّ من العمليتين، بل أيضًا في تأثير كلٍّ منهما عالميًّا. فلو لم يكن ثمة تنفس — أي لم يكن هناك حيوانات وفطريات وبكتيريا تحرق طعامها النباتي — لكان غاز ثاني أكسيد الكربون كله قد تم شفطه من الهواء منذ زمن بعيد، متحولًا إلى كتلة حيوية. وبذلك تتوقف مسيرة الحياة، إلا إذا تسرب قَدْر محدود من ثاني أكسيد الكربون بفعل التحلل البطيء أو من فوهات البراكين. ولكن هذا بعيد تمامًا عما يحدث حقًّا. فما يحدث حقًّا هو أن التنفس يحرق كل الجزيئات العضوية التي تكوِّنها النباتات؛ وفي نطاق زمني جيولوجي، سرعان ما ستختفي النباتات. لهذا الأمر عاقبة واضحة؛ وهي أن كل الأكسجين الذي يتم دفعه إلى الهواء بعملية البناء الضوئي يتم أخذه مجددًا بعملية التنفس. هذا توازن طويل الأمد لا يتغيَّر ولا تبدو له نهاية، وهو بمنزلة قبلة الموت لأي كوكب. والطريقة الوحيدة التي يمكن بمقتضاها أن يمتلك الكوكب غلافًا جويًّا مليئًا بالأكسجين — ومن ثمَّ يتجنَّب مصيرًا كمصير كوكب المريخ — هو أن يتبقَّى قَدْر من المادة النباتية ويتم حفظه سليمًا، منيعًا ضد عناصر البيئة وضد محاولات الحياة البارعة للعثور على طرق لتحليل تلك النباتات للحصول على الطاقة. يجب أن يكون هذا المقدار مدفونًا في باطن الأرض.

وهذا هو ما يحدث بالفعل. فالمادة النباتية المحفوظة يتم دفنها في صورة فحم أو نفط أو غاز طبيعي أو سناج أو فحم نباتي أو تراب، في صخور في عمق باطن الأرض. وحسبما قال عالم الكيمياء الجيولوجية روبرت بيرنر، الذي تقاعد مؤخرًا من جامعة

بيل، فإن مقدار الكربون العضوي «الميت» المحتبس في القشرة الأرضية يزيد بحوالي ٢٦ ألف مرة عمَّا يقابله من الكربون العضوي الذي في جميع أجسام الكائنات الأرضية الحية. إن كل ذرة كربون هي المقابل لجزيء من الأكسجين في الهواء. ومقابل كل ذرة من الكربون نحفر الأرض لنستخرجها، ونحرقها كوقود حفري، يتم سحب جزيء من الأكسجين من الهواء، وتحويله إلى ثاني أكسيد الكربون مجددًا، مع حدوث عواقب وخيمة، وإن كانت غير متوقعة، للمناخ. لحسن الحظ، لن نتمكن من استنزاف إمدادات الأكسجين في العالم بمجرد حرق أنواع الوقود الحفري، حتى إذا تعمَّدْنا تدمير المناخ؛ لأن الغالبية العظمى من الكربون العضوي مدفونة كفتات مجهري في صخور مثل الصخر الصلصالي الطبيعي، الذي لا تستطيع الصناعات البشرية استغلاله، على الأقل على نحوٍ اقتصادي. فحتى الآن، وبالرغم من محاولاتنا المستميتة لحرق كل الاحتياطيات المعروفة من أنواع الوقود الحفري، فكل ما تمَّ خفضه من المحتوى الأكسجيني للهواء هو مجرد جزأين أو ثلاثة أجزاء من المليون؛ أي حوالي ٠٫٠٠١ بالمائة.[١]

ولكن هذا الخزان الشاسع من الكربون العضوي المدفون لا يتكوَّن بصفة مستمرة، بل إنه دُفِن خلال نوبات وتقلبات الحقب الجيولوجية. الوضع الحالي قريب جدًّا من التوازن التام؛ حيث يلغي التنفس تأثير البناء الضوئي (وتلغي عوامل التعرية أي عمليات دفن)؛ ومن ثم لا تحدث عمليات دفن للكربون تقريبًا. ولهذا بقيت مستويات الأكسجين عند حوالي ٢١ بالمائة على مدى عشرات الملايين من السنين. وفي العصور الجيولوجية السحيقة، وإن كان هذا في أحوال نادرة، كانت الأمور مختلفة جدًّا. وربما كان أقوى مثال هو العصر الفحمي أو الكربوني، منذ ٣٠٠ مليون سنة، حينما كانت اليعاسيب الكبيرة في حجم طيور النورس ترفرف في الهواء، والديدان ألفية الأرجل طولها متر وتزحف بين الشجيرات. تلك الكائنات العملاقة دانت بوجودها إلى المعدل الاستثنائي للكربون المدفون في العصر الفحمي، الذي أكسب وجود المخزونات الفحمية الهائلة هذا العصر اسمه. ولأن الكربون كان مدفونًا أسفل المستنقعات الفحمية؛ فقد ارتفعت مستويات الأكسجين لما فوق ٣٠ بالمائة؛ مما أعطى بعض الكائنات الفرصة لتنمو بما يتجاوز حدود أحجامها الطبيعية، وهي بالتحديد، الحيوانات التي تعتمد على الانتشار السلبي للغازات من خلال قنوات في أجسامها أو عبر الجلد، مثل اليعاسيب، وليس من خلال عملية التنفس الإيجابية عن طريق الرئتين.[٢]

والسؤال الآن: ما الذي كان وراء المعدل غير المسبوق لدفن الكربون في العصر الفحمي؟ هناك تشكيلة من العوامل العرضية؛ وهي: اصطفاف القارات، والمناخ الرطب،

ووجود السهول الشاسعة التي تغطيها الفيضانات. ولكن ربما كان أهمها نشوء مادة اللجنين؛ مما أدَّى إلى تكوُّن الأشجار الضخمة والنباتات القوية القادرة على استيطان مساحات شاسعة من الأرض. واللجنين مادة يصعب على البكتيريا والفطريات أن تحللها، ويبدو أنها بدأت تُمثِّل تحدِّيًا لا يُبارى في هذا الشأن بعد نشوئها بقليل، ولا تزال كذلك حتى اليوم. فبدلًا من أن تتحلل لإنتاج الطاقة، فإنها دُفِنَتْ سليمة على نطاق شاسع، وبقي الأكسجين، الذي يُعتبَر مقابلًا لها، بنسب كبيرة في الهواء.

وقعت حوادث جيولوجية في زمنين آخرين جعلت مستويات الأكسجين ترتفع، وربما كانت الحالتان نتاجًا لما حدث من طغيان متكرِّر للجليد على الأرض، وهو ما سُمِّي «الكرة الأرضية الثلجية». حدث الارتفاع الكبير الأول في مستويات الأكسجين منذ حوالي ٢٢٠٠ مليون سنة، وقد تبع فترة صعبة من التقلبات الجيولوجية والتجلد العالمي في أنحاء العالم في ذلك الزمن. وحدثت الفترة الأخرى من التجلد العالمي منذ حوالي ٨٠٠ إلى ٦٠٠ مليون سنة مضت، ويبدو أيضًا أنها أدَّتْ إلى رفع مستويات الأكسجين. ومن المرجح أن تلك الأحداث العالمية الكارثية قد غيَّرَت التوازن بين البناء الضوئي والتنفس، وبين دفن المواد الكربونية وتآكلها. فمع انصهار الكُتَل الجليدية الضخمة وسقوط الأمطار، تسربت المعادن والعناصر الغذائية (كالحديد والنترات والفوسفات)، التي كانت قد انحلَّتْ من الصخور بفعل الثلج، إلى مياه المحيطات، مسببة زيادة كبيرة في نمو البكتيريا والطحالب الناتجة عن البناء الضوئي، وهو أمر يشبه تأثير الأسمدة الكيميائية في الوقت الحاضر، ولكن بقدر أكبر بكثير. ولم يقتصر تأثير الثلج الذائب على إحداث ذلك الازدهار والنمو، ولكن كان هناك ميل أيضًا لدفنه؛ إذ اختلط التراب والثلج المتسخ وفتات الصخور التي انجرفت إلى مياه المحيطات بالبكتيريا النامية، وترسب الخليط تدريجيًّا، دافنًا الكربون بدرجة غير مسبوقة. وحدث مع هذه الوقائع ارتفاع عالمي طويل الأمد في الأكسجين.

وهكذا يُوجَد انطباع بالتصادف العرضي يتعلَّق بأكسجة كوكبنا الأرضي. ويتعزز هذا الانطباع بفعل غياب أي تغيُّر على مدى فترات طويلة فيما عدا الذي ذكرناه. ففي الحقبة الطويلة من ٢٠٠٠ مليون سنة مضت إلى حوالي ١٠٠٠ مليون سنة مضت — وهي حقبة يُسمِّيها علماء الجيولوجيا «المليار الممل» — يبدو على وجه التقريب أنه لم يحدث شيء يستحق الذكر؛ إذ بقيت مستويات الأكسجين ثابتة ومنخفضة طوال تلك الحقبة الموغلة في القدم، كما حدث في أزمان أخرى على مدى مئات الملايين من السنين. إن الركود المطبق هو الأساس، بينما تتسبب نوبات عدم الاستقرار الجيولوجي في تغيرات

طويلة الأمد، ربما تقع عوامل جيولوجية مشابهة على كواكب أخرى أيضًا. ولكن يبدو أن حدوث الحركات التكتونية والنشاط البركاني أمر ضروري لإحداث التفاعلات العرضية اللازمة لكي يتراكم الأكسجين. وليس من المستحيلات أن تكون عملية البناء الضوئي قد ظهرت على كوكب المريخ منذ زمن بعيد، ولكن هذا الكوكب الصغير بما فيه من لب بركاني منكمش لم يستطع الحفاظ على مستوى التدفق الجيولوجي المطلوب حتى يتراكم الأكسجين، ثم لاحقًا فَقَدَ هذه القدرة.

ولكن ثمة سبب آخر أكثر أهمية جَعَلَ عملية البناء الضوئي لا تؤدي بالضرورة إلى وجود غلاف جوي من الأكسجين على كوكبٍ ما؛ فعملية البناء الضوئي في حد ذاتها قد لا تعتمد على الماء كمادة خام مطلقًا. كلنا نعرف تلك الصورة من البناء الضوئي التي نراها حولنا؛ فالنخيل والأشجار والأعشاب البحرية كلها تعمل أساسًا بنفس الطريقة لإطلاق الأكسجين — وهي عملية تُعرَف بالبناء الضوئي الأكسجيني — ولكن إذا رجعنا عدة خطوات إلى الوراء وتأمَّلْنا البكتيريا فسنجد أن لديها خيارات أخرى كثيرة؛ فبعض البكتيريا البدائية نسبيًّا تستخدم الحديد المذاب أو كبريتيد الهيدروجين بدلًا من الماء. وإذا كانت تلك المواد تبدو كمواد خام غير معقولة بالنسبة لنا، فهذا فقط لأننا اعتدنا تمامًا على عالمنا المؤكسج — الذي هو نتاج البناء الضوئي «الأكسجيني» — لدرجة تجعل من الصعب علينا أن نتخيَّل حالات كانت تحدث في فترة مبكرة من حياة كوكب الأرض حينما نشأت عملية البناء الضوئي لأول مرة.

يصعب علينا كذلك أن نتفهم آلية البناء الضوئي، التي قد تتعارض مع البديهة ولكنها في الواقع بسيطة. دعني أعطك مثالًا أشك — ربما بشكل غير عادل — في أنه يُوضِّح المفهوم العام للبناء الضوئي. في كتابه الرائع «الجدول الدوري»، الذي نُشِر في عام ١٩٧٥، واختاره جمهور القراء (ومنهم أنا شخصيًّا) كأكثر كتب العلوم شعبية على الإطلاق، وتم ذلك الانتقاء في المعهد الملكي بلندن في عام ٢٠٠٦؛ يقول المؤلف بريمو ليفي:

> تدخل ذرة من الكربون ورقة النبات، فتصطدم بجزيئات أخرى لا حصر لها (وإن كانت هنا بلا فائدة) من النيتروجين والأكسجين. وهي تلتصق بجزيء كبير ومعقد ينشطها، وفي نفس الوقت تتلقى الرسالة الحاسمة من السماء، في صورة حزمة وامضة من الضوء الشمسي، وفي لحظة، مثلما يقتنص العنكبوت

> الحشرة ينفصل الكربون عن الأكسجين الذي ارتبط به، ويتحد مع الهيدروجين (وأظن) مع الفسفور أيضًا. وفي النهاية ينعقد في سلسلة، لا يهم إن كانت طويلة أو قصيرة، ولكنها سلسلة الحياة.

هل لاحظت الخطأ؟ في الحقيقة هناك خطآن، ومن المؤسف أن ليفي تغاضى عنهما؛ إذ إن الكيمياء الحقيقية للبناء الضوئي جرى توضيحها قبل تاريخ هذا الكتاب بأربعين عامًا؛ فليس ما يحدث أن حزمة وامضة من الضوء الشمسي تقوم بتنشيط ثاني أكسيد الكربون، بل إنه يمكن تنشيطه بنفس الدرجة أيضًا في الليل، وهو حقًّا لا يتم تنشيطه بالضوء، أيًّا كان، حتى في أشد أشعة الشمس سطوعًا. كما لا ينفصل الكربون في لحظة عن الأكسجين، بل يبقى الأكسجين مرتبطًا بالكربون بشدة. وأما افتراض ليفي بأن الأكسجين المنطلق من عملية البناء الضوئي يأتي من ثاني أكسيد الكربون — وهو افتراض شائع — فإنه خطأ مؤكد. فهذا لا يحدث، بل يأتي الأكسجين من الماء، وهذا يصنع كل الفارق في عالمنا. وإنها الخطوة الأولى لكي نفهم كيف نشأ البناء الضوئي، كما أنها الخطوة الأولى لحل أزمات الطاقة والبيئة في كوكبنا.

تشق حزم الطاقة الشمسية التي تُستخدَم في عملية البناء الضوئي جزيء الماء إلى عنصريه: الهيدروجين والأكسجين. وهو نفس التفاعل الذي يحدث على مستوى كوكبنا ككلٍّ حينما «تنزف» المحيطات إلى الفضاء، مدفوعة بقوة تأثير الإشعاع فوق البنفسجي. وما تُحقِّقه عملية البناء الضوئي — وما فشلنا نحن في تحقيقه حتى الآن — هو أن يكون لديها عامل محفز يمكنه العمل على فصل الهيدروجين عن الماء بأقل مأخذ من الطاقة، باستخدام ضوء الشمس اللطيف وليست الأشعة اللافحة فوق البنفسجية أو الكونية. وحتى يومنا هذا انتهت كل جهودنا الإبداعية البشرية إلى استهلاك المزيد من الطاقة في تحليل الماء إلى شِقَّيْه بأكثر مما يتم الحصول عليه بهذه العملية. وحينما ننجح في محاكاة البناء الضوئي، باستخدام عامل محفز بسيط يمكنه فصل ذرات الهيدروجين ببساطة عن الماء سنكون قد حللنا أزمة الطاقة العالمية؛ إذ يمكن بحرق ذلك الهيدروجين الوفاء باحتياجات الطاقة العالمية دون عناء، مع استعادة الماء مجددًا كناتج ثانوي وحيد؛ فلا تلوُّث ولا آثار كربونية، ولا احترار عالمي. إلا أنها ليست بالمهمة السهلة؛ إذ يُعتبَر الماء تركيبة من الذرات شديدة الثبات بشكل مذهل، وتشهد المحيطات على هذا؛ فحتى أقسى العواصف وأهوجها، التي تضرب الصخور وتكاد تسحقها، تعجز عن تفكيك الماء إلى مُكوِّنَيْه من الذرات. إن الماء في الحقيقة هو أكثر المواد الخام انتشارًا في كوكبنا وأكثرها

صعوبة في التكوين. وكم سيحب البحَّارُ الحديثُ أن يُزوِّد سفينته بالماء كوقود مستعينًا بالقليل من أشعة الشمس. ولعله يسأل الطفاوة الخضراء العائمة على أمواج البحر عن كيفية عمل ذلك.

ولقد واجهت نفس المشكلة الأسلاف البعيدة لتلك الطفاوة، أي أسلاف البكتيريا الزرقاء التي تعيش اليوم، والتي هي الصورة الوحيدة للحياة على كوكبنا التي جرَّبَتْ حيلة تحليل الماء إلى شِقَّيْه. والأمر الغريب أن البكتيريا الزرقاء تُحلِّل الماء لنفس السبب الذي جعل أقرباءها من البكتيريا تُحلِّل كبريتيد الهيدروجين أو تُؤكسِد الحديد؛ فهي تحتاج إلى الإلكترونات. وظاهريًّا، يبدو الماء آخر مكان يمكن العثور فيه على تلك الإلكترونات.

وهكذا إذا تأَمَّلْنا عملية البناء الضوئي فسنجدها بسيطة؛ إذ إنها كلها تتعلق بالإلكترونات. أضِفْ قليلًا من الإلكترونات إلى ثاني أكسيد الكربون، وأضِفْ معها قليلًا من البروتونات لموازنة الشحنات الكهربية، وهكذا نحصل على السكر. والسكريات جزيئات عضوية؛ فهي سلسلة الحياة التي تحدَّثَ عنها بريمو ليفي والمصدر الأساسي لطعامنا كله. ولكن من أين تأتي الإلكترونات؟ يمكن بقليل من الطاقة الشمسية أن تأتي الإلكترونات من أي مكان تقريبًا. في حالة الصورة «الأكسجينية» المألوفة من البناء الضوئي تأتي الإلكترونات من الماء، ولكن في واقع الأمر من الأسهل بكثير أن تنزعها من مركبات أخرى أقل ثباتًا من الماء. فخُذِ الإلكترونات من كبريتيد الهيدروجين وبدلًا من أن تُطلِق الأكسجين إلى الهواء، فإنك ترسب عنصر الكبريت، أو خذ الإلكترونات من الحديد الذائب في المحيطات (في صورة حديدوز) فتحصل على حديد أحمر ضارب إلى اللون البني (في صورة حديديك)، والذي يستقر كصخور جديدة، وهي عملية ربما كانت مسئولة منذ القدم عما تُسمَّى «ترسبات الحديد الشريطي» الشاسعة التي تُوجَد في أنحاء العالم، وتشكل في يومنا هذا أكبر الاحتياطيات المتبقية من خام الحديد منخفض الجودة.

يُعتبَر هذان الشكلان من البناء الضوئي هامشيين في عالمنا اليوم الغني بالأكسجين، والسبب ببساطة أن المادتين الخام — كبريتيد الهيدروجين أو الحديد المذاب — نادرًا ما تجد أيًّا منهما في المياه جيدة التهوية. ولكن في العصور السحيقة حينما كانت الأرض في مقتبل عمرها، وقبل ظهور الأكسجين الحر، كانتا إلى أبعد حدٍّ هما أسهل مصدر للإلكترونات، وكانت المحيطات مشبعة بهما. وهذا الأمر يثير تساؤلًا فيه تناقض ظاهري، ويُعتبَر حله أساسيًّا في فهم كيفية نشوء البناء الضوئي لأول مرة: لماذا تحوَّلَت العملية

عن مصدر ثري ومريح للإلكترونات إلى مصدر أكثر إثارة للمشاكل وهو الماء؛ الذي يُعَدُّ ناتجه الثانوي أو «نفايته» — وهو الأكسجين — غازًا سامًّا بالنسبة للبكتيريا ويمكن أن يُسبِّب أضرارًا مادية جسيمة لجميع أنواع البكتيريا التي تنتجه؟ إن حقيقة أنه في ضوء توافر قوة الشمس، وعامل محفز ماهر، يكون الماء أكثر وفرة من كلتا المادتين الخام سالفتَيِ الذِّكْر ليست لها أهمية؛ إذ لا يتمتَّع التطور بنظرة مستقبلية. الأمر عينه ينطبق على حقيقة أن البناء الضوئي الأكسجيني قد غيَّر وجه العالم؛ إذ إن هذا لا يُشكِّل أي فارق من منظور العالم. فما نوع الضغوط أو الطفرات البيئية التي يمكن أن تكون قد دفعَتْ إلى حدوث هذا التحوُّل نحو الماء؟

الإجابة السهلة التي ستجدها في كثير من الكتب الدراسية هي أن المادتين الخام السابقتين كانتا قد بدأتا في النضوب؛ فتحوَّلَت الحياة نحو الماء؛ نظرًا لعدم وجود بدائل سهلة متاحة، تمامًا كما يُتوقَّع لنا أن نتحوَّل إلى استخدام الماء كوقود بعد أن تنضب أنواع الوقود الحفري. ولكن هذه الإجابة لا يمكن أن تكون صحيحة؛ فالسِّجل الجيولوجي يوضِّح أن البناء الضوئي «الأكسجيني» كان قد نشأ قبل أن تنضب جميع تلك المواد الخام السابقة، بأكثر من مليار سنة. فالحياة لم تكن مجبرة على هذا التحوُّل قسرًا.

ثمة إجابة أخرى، بدأت تنبثق الآن، وتكمن مختفية في آلية البناء الضوئي ذاتها، وهي إجابة أجمل حقًّا. إنها إجابة تجمع بين المصادفة والحتمية؛ إجابة تلقي الضوء وتضفي البساطة على واحدة من أكثر عمليات الاستخراج تعقيدًا والتفافًا في العالم.

في النباتات، تجري عملية استخراج الإلكترونات فيما تُسمَّى حبيبات (أو بلاستيدات) الكلوروفيل، وهي تراكيب دقيقة خضراء تُوجَد في خلايا جميع أوراق النباتات، وجميع أوراق الحشائش، وتُضْفي لونها الأخضر على أوراق النباتات ككلٍّ. وسُمِّيَتْ هكذا تبعًا للصبغ النباتي الذي أسبغ عليها لونها. ذلك الصبغ هو الكلوروفيل، الذي يُعتبَر مسئولًا عن امتصاص طاقة الشمس في عملية البناء الضوئي. ويُوجَد الكلوروفيل مدفونًا في نظام غشائي غير عادي يكوِّن الجانب الداخلي لحبيبات الكلوروفيل. تأخذ تلك الحبيبات شكل أقراص مسطحة تتكدَّس في الخلايا النباتية، وتبدو لمن يتأملها مثل محطة طاقة فضائية في فيلم من أفلام الخيال العلمي، ويرتبط بعضها ببعض عن طريق أنابيب سريعة النقل، تتقاطع عَبْر سيتوبلازم الخلية بجميع الزوايا والارتفاعات. وداخل هذه الأقراص

الخضراء نفسها يجري العمل الأهم لعملية البناء الضوئي: استخراج الإلكترونات من الماء.

قُلْنا إن استخراج الإلكترونات من الماء عمل صعب؛ ومن ثم فإن النباتات تصنع في هذا العمل وجبة غير عادية. إن مركبات البروتينات والأصباغ النباتية كبيرة جدًّا — من الناحية الجزيئية — لدرجة أنها تُقارِب في عملها عمل مدينة صغيرة. وهي ككلٍّ تُشكِّل مجموعتين كبيرتين من المركبات؛ تُعرَفان بالنظام الضوئي ١ والنظام الضوئي ٢، وتحتوي كل حبيبة كلوروفيل على آلاف من هذين النظامين. ووظيفتهما هي التقاط حزمة من الضوء، وتحويلها إلى مادة حية. وقد أُجْرِيَتْ أبحاث كثيرة لمعرفة كيفية إنجاز هذا العمل واستغرقت تلك الأبحاث جانبًا كبيرًا من قرن كامل، وتطلبت بعضًا من أكثر التجارب ذكاء ومهارة في التاريخ. ومما يُؤسَف له أن المكان هنا لا يسمح بشرح تلك الأمور.[٣] ولكننا في حاجة إلى أن نشغل أنفسنا فقط بما تعلمناه وما يجب أن نقوله عن ذلك الاختراع الذي يُسمَّى البناء الضوئي.

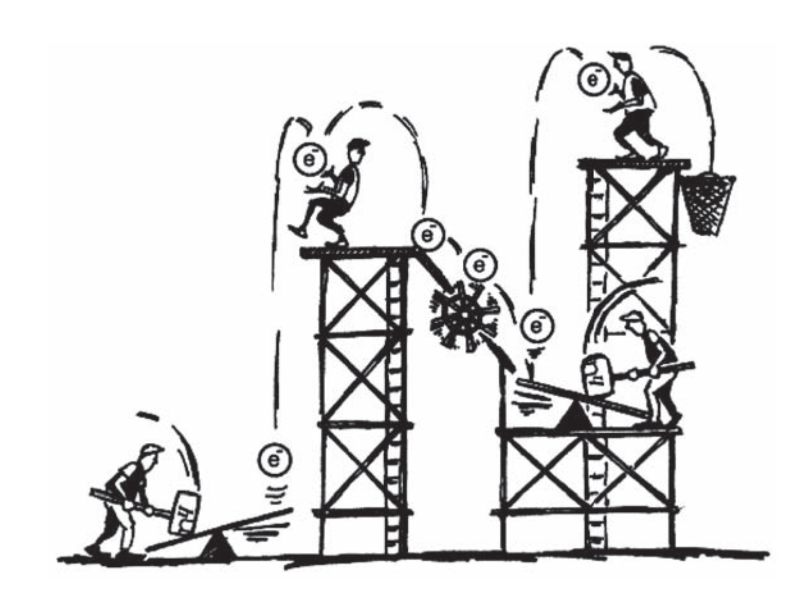
يعرف الأساس المفاهيمي لعملية البناء الضوئي؛ أي خارطة الطريق التي تفسر عمله، بما يُسمَّى «المخطط Z»، وهو صيغة تُلهِب خيال طلبة الكيمياء الحيوية وتبثُّ الرعب في قلوبهم على حد سواء. وضع هذا المخطط رجل إنجليزي ألمعي، وإن كان شديد التحفظ، يُدعَى روبن هيل في عام ١٩٦٠، ويشرح المخطط Z «ملامح الطاقة» لعملية البناء الضوئي. كانت ألفاظ هيل مبهمة مقتضبة، فلم يشأ أو لم يجرؤ حتى مَنْ زاملوه في معمله أنفسهم على إظهار جهلهم بما يفعله، حتى إنهم فُوجِئوا بنشر فرضيته تلك في مجلة «نيتشر» في عام ١٩٦٠، فلم تكن لديهم فكرة، إلا القليل، عما كان يقوم به. وفي واقع الأمر لم يكن المخطط Z مبنيًّا على تجارب هيل، التي كانت لها أهمية كبيرة، ولكنه كان مأخوذًا من عدد من الملاحظات التجريبية المحيِّرة. وعلى رأس تلك الملاحظات موضوع مثير للفضول يتعلَّق بالديناميكا الحرارية. فلقد تبيَّنَ أن عملية البناء الضوئي لا تنتج مادة عضوية جديدة فحسب، بل إنها تنتج أيضًا مادة ثلاثي فوسفات الأدينوسين، التي تُعتبَر «عملة الطاقة» للحياة. ومما يثير التعجب أن هذين الشيئين يبدو أنهما يكونان معًا دائمًا؛ فكلما زاد ما ينتجه البناء الضوئي من مادة عضوية زاد مقدار ثلاثي فوسفات الأدينوسين، والعكس بالعكس (فإذا انخفضت كمية المادة العضوية انخفض كذلك إنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين). يبدو أن الشمس ترسل وجبتَيْ غذاء مجانيتين بشكل متزامن. وكان روبن هيل يتمتع بالبصيرة التي جعلته يفهم آلية البناء الضوئي

بكاملها من هذه الحقيقة بمفردها؛ فمن العبقرية — كما يُقال — أن يكون لدى المرء القدرة على رؤية ما هو واضح بديهي قبل أي شخص آخر.[٤]

لكن تبيَّن أن مصطلح المخطط Z خادع، شأنه شأن أي شيء آخر مرتبط بهيل. فحرف Z يجب حقًّا أن نديره بزاوية ٩٠ درجة ليصبح حرف N؛ وحينئذٍ سوف يعكس بشكل أدق ملامح الطاقة المتعلقة بالبناء الضوئي. تخيَّل الجزء الصاعد من حرف N كتفاعل رأسي متجه إلى أعلى؛ فيجب أن يتمَّ التزوُّد بالطاقة ليتم هذا التفاعل. أما الجزء النازل بميل من حرف N فهو تفاعل متجه لأسفل كشلال مائل؛ وهو يطلق الطاقة التي يمكن التقاطها وتخزينها في صورة ثلاثي فوسفات الأدينوسين. ثم الارتفاع الأخير من حرف N هو تفاعل متجه لأعلى مجددًا ويتطلب إمدادًا بالطاقة.

في عملية البناء الضوئي يقع كلا النظامين الضوئيين ١ و٢ عند النقطتين السفليتين من الحرف N. ففوتون الضوء يضرب النظام الضوئي ١ فيطلق إلكترونًا لأعلى نحو مستوى أعلى من الطاقة، ثم يهبط مستوى الطاقة لهذا الإلكترون في سلسلة من الخطوات الجزيئية الصغيرة التي توفر الطاقة المطلوبة لصنع ثلاثي فوسفات الأدينوسين. وحين يعود الإلكترون إلى مستوى طاقته المنخفض يصل إلى النظام الضوئي ٢؛ حيث يطلقه فوتون ثانٍ لأعلى في المرة الثانية لمستوى طاقة أعلى. وفي هذه النقطة العالية الثانية يكون الإلكترون قد انتقل إلى ثاني أكسيد الكربون، وهي الخطوة الأولى لصنع السكر. وقد رسم ريتشارد ووكر رسمًا كاريكاتوريًّا (انظر الشكل ٣-١) يصور العملية كلعبة اختبار قوة في الساحة، حيث يضرب المتباري على رافعة معدنية بالمطرقة لتدفع قطعة معدنية لأعلى على طول عمود رأسي ليدق الجرس في أعلى العمود. وفي هذه الحالة يعطي تأرجح المطرقة الطاقة اللازمة لضرب قطعة الدق لكي ترتفع لأعلى العمود، وفي حالة عملية البناء الضوئي تقوم طاقة فوتون صادر من الشمس بنفس المهمة.

يُعتبَر المخطط Z — أو لِتُسمِّه المخطط N إذا شئت — طريقة ملتفة بشكل غريب لعمل الأشياء، ولكنَّ هناك أسبابًا تقنية قوية لذلك. فهي تقوم بمهمة تتمثَّل في الإقران بين إزالة الإلكترونات من الماء وبين تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى سكر، وهي مهمة من المستحيل كيميائيًّا القيام بها بصورة أخرى. ويتعلَّق السبب بطبيعة نقل الإلكترونات، وبوجه خاص، بالانجذاب الكيميائي للإلكترونات تجاه مركبات معينة. وكما رأينا من قبل، فإن الماء شديد الثبات، وله قوة جذب عالية لإلكتروناته. ولكي نسرق إلكترونًا من الماء فهذا يتطلب قوة شد هائلة، بمعنى أننا نحتاج إلى عامل مؤكسِد قوي جدًّا،



شكل ٣-١: رسم كاريكاتوري لريتشارد ووكر يصوِّر المخطط Z. طاقة الفوتون، التي ترمز إليها ضربة المطرقة، تضرب الإلكترون ليرتفع إلى مستوى طاقة أعلى. وحينما يهبط الإلكترون عائدًا لأسفل، كما يسقط الشلال إلى مستوى طاقة أقل، ينطلق قَدْرٌ من الطاقة لِيبُثَّ النشاط في الخلية. ثم يأتي فوتون ثانٍ حينئذٍ ليضرب الإلكترون ليرتفع لأعلى مجددًا إلى مستوى طاقة أعلى من السابق، حيث يتم التقاطه في صورة جزيء عالي الطاقة NADPH وذلك يتفاعل فيما بعد مع ثاني أكسيد الكربون ليكوِّن جزيئًا عضويًّا.

وهذا العامل المؤكسد القوي هو شكلٌ شَرِهٌ من الكلوروفيل، يمكننا تسميته «السيد هايد الجزيئي» الذي تحوَّلَ إلى هذه الصورة من صورة دكتور جيكل الخنوع عن طريق امتصاص فوتونات عالية الطاقة.[٥] ولكن من المعروف أن الشيء الذي يكون ماهرًا في الأخذ يَمِيل إلى أن يكون أقلَّ مهارة في العطاء. ومن ثم؛ فإن الجزيء الذي يمسك بالإلكترون بإحكام يكون غير ميَّال كيميائيًّا لأن يتخلَّى عنه طواعية، تمامًا مثل السيد هايد مبغض البشر، أو أي شخص بخيل عضوض على ما له؛ فليست لديه قابلية لأن يعطي من ثروته بكرم تلقائي. وكذلك الحال مع ذلك الشكل من الكلوروفيل؛ فحينما يتم تنشيطه بالضوء تكون لديه قوة هائلة في جذب الإلكترونات من الماء، ولكن تِقلُّ

لديه القدرة على الدفع بها مجددًا لأي مادة أخرى. أي باختصار مُبسَّط نقول إنه عامل مؤكسد قوي، ولكنه عامل مختزل ضعيف.

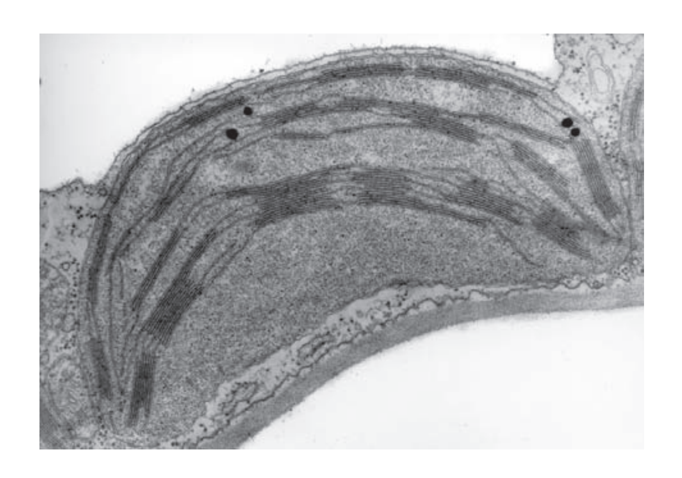
أما ثاني أكسيد الكربون فيعاني من مشكلة عكسية؛ فهو كذلك شديد الثبات، ولكن لا تكون لديه الرغبة كيميائيًّا في أن يتلقَّى المزيد من الإلكترونات. فهو لن يقبل أي إلكترونات إلا على مضض من عامل آخر شديد القوة في الدفع بالإلكترونات؛ أي من عامل مختزل قوي. وهذا يتطلب شكلًا آخر من الكلوروفيل؛ شكلًا يكون شديد المهارة في الدفع، وشديد الضعف في الجذب، فبدلًا من أن يكون بخيلًا قابضًا على حاجياته، فإنه أقرب للبائع المتجول الذي يُجْبِر المارة على شراء منتجات رديئة منه. وحينما يتم تنشيط ذلك الشكل من الكلوروفيل بالضوء تكون لديه القدرة على الدفع بإلكتروناته إلى جزيء آخر — يمكن تشبيهه بمساعد البائع المتجول — يريد في الوقت نفسه أن يتخلص منها وهو جزيء NADPH؛ ومن ثم تدفع الإلكترونات إلى ثاني أكسيد الكربون.[٦]

وهكذا هناك سبب لوجود نظامين ضوئيين في عملية البناء الضوئي، ولا عجب هنالك. ولكن السؤال الأكثر صعوبة هو: كيف نشأ وتطور هذا النظام المعقد المترابط؟ وللإجابة نقول: يُوجَد في الحقيقة خمسة أجزاء متتابعة في هذا النظام. أولها هو «مركب إنتاج الأكسجين»؛ وهو نوع من كسَّارة البندق الجزيئية التي تضبط مواضع وأوضاع جزيئات الماء بحيث يتم تكسيرها الواحد منها تلو الآخر لإخراج إلكتروناتها منها، مع إطلاق الأكسجين كناتج ثانوي. ثم يأتي دور النظام الضوئي ٢، (وهذا مما يثير الارتباك؛ إذ سُمِّي النظامان الضوئيان ١ و٢ بترتيب معكوس لأسباب تاريخية)، الذي حينما ينشطه الضوء يتحوَّل إلى مستر هايد الجزيئي، فينتزع هذه الإلكترونات من مركب إنتاج الأكسجين. ثم تأتي سلسلة خاصة بنقل الإلكترونات، وهذه تنقل الإلكترونات بعيدًا، مثل لاعبي الرجبي الذين يمررون الكرة بعرض الملعب. ثم تستخدم سلسلةُ نَقْل الإلكترونات فَرْق مستوى الطاقة المتدرج لصنع القليل من ثلاثي فوسفات الأدينوسين، قبل تسليم نفس الإلكترونات إلى النظام الضوئي ١. وهنا يأتي فوتون آخر ليضرب الإلكترونات لترتفع إلى مستوى طاقة أعلى؛ حيث يتلقفها جزيء NADPH (مساعد البائع المتجول الجزيئي) وهو قادر على دفع الإلكترونات بقوة، ولا يريد أفضل من أن يتخلص منها مجددًا. وفي النهاية تأتي الآليات الجزيئية المطلوبة لتنشيط ثاني أكسيد الكربون وتحويله إلى سكر. وباستخدام الـ NADPH المتولد عن النظام الضوئي ١ يتم تشغيل عملية تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى سكر، وذلك بواسطة الكيمياء وليس الضوء، وهو ما يُعرَف بالتفاعل المظلم، وهو ملمح أخفق بريمو ليفي في إدراكه.

تعمل هذه الأنظمة الخمسة في تتابع لانتزاع الإلكترونات من الماء ودفعها مجددًا إلى ثاني أكسيد الكربون. إنها طريقة شديدة التعقيد لكسر بندقة، ولكنها على ما يبدو تكاد تكون الطريقة الوحيدة لكسر تلك البندقة تحديدًا. والسؤال التطوري الكبير هنا هو: كيف ظهرت تلك الأنظمة المعقدة المترابطة فيما بينها إلى حيِّز الوجود، وكيف تم تنظيمها بهذه الطريقة الصحيحة، تلك الطريقة التي قد تكون الطريقة الوحيدة لجعل البناء الضوئي الأكسجيني يؤدي مهمته؟

إن كلمة «حقيقة» من المرجح دائمًا أن تجعل علماء الأحياء يرتعدون؛ إذ إن هناك الكثير من الاستثناءات لكل قاعدة، ولكن هناك حقيقة تُعتبَر مؤكدة فعليًّا في عملية البناء الضوئي الأكسجيني، وهي أنها نشأت دفعة واحدة. فمقر البناء الضوئي، أي حبيبة أو بلاستيدة الكلوروفيل، يُوجَد في جميع الخلايا المتخصصة في البناء الضوئي في جميع النباتات وجميع الطحالب؛ فحبيبات الكلوروفيل واسعة الانتشار ويرتبط بعضها ببعض بوضوح. وهي تشترك معًا في تاريخ سري. وتكمن القرينة على ماضيها في حجمها وشكلها؛ إذ تشبه البكتيريا الصغيرة التي تعيش داخل خلية عائل أكبر حجمًا (انظر الشكل ٣-٢). وهذا الشبه بالبكتيريا تم إثباته بوجود حلقات مستقلة من الدي إن إيه في جميع حبيبات الكلوروفيل. وهذه الحلقات من الدي إن إيه يتم صنع نُسَخ منها كلما انقسمت حبيبات الكلوروفيل، ويجري تمريرها إلى «نسلها» بنفس الطريقة مثل البكتيريا. أيضًا، فإن التتابع التفصيلي لأحرف الدي إن إيه الخاص بحبيبات الكلوروفيل لا يقتصر أمره على كونه يؤكد الرابطة التي بينها وبين البكتيريا، ولكنه يشير أيضًا إلى أقرب أقربائها الأحياء؛ وهي البكتيريا الزرقاء. وأخيرًا وليس آخرًا، فإن مخطط Z المتعلق بالبناء الضوئي النباتي، بجميع أجزائه الخمسة المكوِّنة له، يُوجَد تمامًا (ولكن بآلية أبسط) في البكتيريا الزرقاء. واختصارًا نقول بلا شك إن حبيبات الكلوروفيل كانت أسلافها من البكتيريا الزرقاء الحرة.

والبكتيريا الزرقاء، التي كانت تُسمَّى سابقًا خطأً بالطحالب الزرقاء المخضرة، تُعتبَر المجموعة الوحيدة المعروفة من البكتيريا التي يمكنها أن تُحلِّل الماء من خلال الشكل «الأكسجيني» من عملية البناء الضوئي. ولكن لا تزال كيفية وصول بعضٍ من أعداد تلك البكتيريا لتعيش داخل خلية عائل أكبر حجمًا لغزًا مختفيًا في غياهب أحقاب جيولوجية موغلة في القدم. لا شكَّ أن ذلك حدث منذ أكثر من ١٠٠٠ مليون سنة خلَتْ، ولكن



شكل ٣-٢: شكل نموذجي لحُبَيْبة كلوروفيل من نبات البنجر (من نوع بيتا فلجاريس)، تظهر أكوام الأغشية (الثيلاكويدات)؛ حيث يتحلل الماء إلى عُنصرَيْه لإطلاق الأكسجين في عملية البناء الضوئي. وليس ذلك التشابه مع البكتيريا من قبيل المصادفة؛ فحبيبات الكلوروفيل كانت أسلافها من البكتيريا الزرقاء الحرة.

يُفترَض أنها ابتُلعت ببساطة في وقت ما، ولم تُهضَم (وهو أمر شائع)، ثم ظهرت فائدتها لخلية العائل الخاصة بها في نهاية الأمر. والعائل الذي تمَّ تلقيحه وتلقيمه بالبكتيريا الزرقاء، استمرَّ تطوُّره حتى تكوَّنَتْ منه مجموعتان نباتيتان كبيرتان هما: الطحالب والنباتات؛ لأنها جميعًا اليوم تتميَّز بقدرتها على أن تعيش على الشمس والماء، عن طريق ذلك الجهاز المختص بالبناء الضوئي الذي توارثته عن أسلافها من البكتيريا.

ومن ثمَّ يصبح التساؤل عن أصل البناء الضوئي تساؤلًا عن أصل البكتيريا الزرقاء، وهي النوع الوحيد من البكتيريا الذي حلَّ مشكلة تحلُّل الماء. هذه واحدة من أكثر روايات علم الأحياء الحديث إثارة للجدل، جدل لم يُحسَم أمره إلى اليوم.

حتى منعطف الألفية الحالية، كان معظم الباحثين مقتنعين — وإن كانوا في حيرة — بالنتائج المدهشة التي توصَّلَ إليها عالم يُدعى بيل شوبف، الأستاذ النشيط الميال للنزاع لعلم الأحياء الحفرية في جامعة كاليفورنيا، بمدينة لوس أنجلوس الأمريكية. فمنذ عقد الثمانينيات من القرن العشرين اكتشف شوبف وحلَّل عددًا من أقدم حفريات الحياة على

الأرض، والتي يرجع زمنها إلى حوالي ٣٥٠٠ مليون سنة. ويحتاج لفظ «حفرية» إلى قليل من التوضيح هنا. فما وجده شوبف كانت خيوطًا من كبسولات صخرية ميكروسكوبية، وهذه كانت تشبه البكتيريا كثيرًا، وفي نفس أحجامها الحقيقية تقريبًا. وقد افترض شوبف في بداية الأمر، على أساس البنية التفصيلية لتلك الحفريات الميكروسكوبية، أنها من البكتيريا الزرقاء. كانت تلك الحفريات الميكروسكوبية الدقيقة تُوجَد ضمن قطع نسيجية حفرية (تُسمَّى «ستروماتوليتات» حفرية). أما الستروماتوليتات الحية فهي على شكل قباب مشبعة بالمعادن وتنمو في طبقات متزايدة، تصل ارتفاعاتها إلى متر تقريبًا، وتتكوَّن من مجتمعات مزدهرة من البكتيريا التي تُشكِّل قشور الطبقات المعدنية المدفونة (انظر الشكل ٣-٣). وفي نهاية الأمر تتحوَّل البنية كلها إلى صخر صلد، وغالبًا ما يبدو جميل المنظر عند أخذ قطاع منه. عادة ما نجد الطبقات الخارجية الحية من الستروماتوليتات الحديثة تعج بالبكتيريا الزرقاء، ومن ثم افترض شوبف أن تلك الأشكال العتيقة دليل إضافي على الظهور المبكر للبكتيريا الزرقاء. وخشية من وجود أي شك، استطرد شوبف في عمله ليظهر أن تلك الحفريات المشكوك في أمرها تحتوي على بقايا من كربون عضوي، من نوع اعتُبِر علامة مؤكَّدة على الحياة؛ ليست فقط أي حياة قديمة، ولكنها حياة مارست البناء الضوئي. وقال شوبف إن البكتيريا الزرقاء، أو كائنات شابهتها كثيرًا، قد نشأت على الأرض منذ ٣٥٠٠ مليون سنة مضَتْ، أي بعد نهاية فترة تعرُّض الأرض للقصف الكبير من الكويكبات — تلك الفترة التي ميَّزَت السنوات المبكرة لكوكبنا — ببضع مئات من ملايين السنوات فقط، بل إن هذا حدث بعد تكوُّن النظام الشمسي نفسه بفترة قصيرة نسبيًّا.

لم يكن سوى قلة من الناس مستعدين لتحدي تقييم شوبف لهذه الحفريات العتيقة، بل إن هذه القلة نفسها بدت مقتنعة بما قال. كان هناك آخرون أكثر تشككًا، وإن كانوا أقل خبرة. لم يكن من السهل أن يقبل المرء بفكرة النشوء المبكر للبكتيريا الزرقاء — والمفترض أنها كانت تطلق الأكسجين كناتج ثانوي كما تفعل اليوم — مع وجود أول علامات جيولوجية للأكسجين في الجو، واستمرار ذلك إلى ما يزيد عن مليار سنة بعدها. ولعل ما كان أكثر أهمية أن تعقيد المخطط Z جعل معظم علماء الأحياء يرفضون فكرة أن يكون البناء الضوئي الأكسجيني قد نشأ بهذه السرعة. ونظرًا لأن أشكال البناء الضوئي الأخرى أكثر بساطة؛ فقد بدا أنها تتوافق على نحوٍ أفضل مع تلك الأوقات العتيقة. وبصفة عامة نقول إن معظم الناس تقبَّلوا أن ما تم اكتشافه هو



شكل ٣-٣: ستروماتوليتات حية في بركة هاملين، قرب خليج القرش في غرب أستراليا. تَصِل درجة ملوحة البركة إلى ضعف ملوحة البحار والمحيطات العادية، وهذا يَعُوق تكاثر الكائنات البحرية مثل القواقع، ويمكِّن مستعمرات البكتيريا الزرقاء من الازدهار.

بكتيريا بالفعل، وربما كانت بكتيريا تستخدم البناء الضوئي، ولكن كان ثمة شكوك عما إذا كانت بالفعل من البكتيريا الزرقاء، وهذه هي قمة المشكلة.

ثم جاء مارتن برايسير أستاذ علم الأحياء الحفرية بجامعة أكسفورد، وخطا إلى الحلبة، فتحوَّل الأمر إلى واحدة من أحمى المعارك في علم الحفريات في العصر الحديث، وهو علم عُرِف عامة بالطباع الانفعالية لكبار رجاله، مع مرونة ومطاطية الكثير من أدلته. اتَّكَل معظم الباحثين المهتمين بالحفريات الشديدة القِدَم على العينات القابعة في متحف التاريخ الطبيعي بلندن، ولكن برايسير رجع إلى المكان الجيولوجي الذي استخرج منه شوبف حفرياته أصلًا، فشعر بالصدمة؛ إذ وجد المكان بعيدًا عن أن يكون ذلك المسطح البحري الضحل الهادئ الذي افترض شوبف وجوده، بل كانت المنطقة كلها تتخللها العروق الحرارية الأرضية، وهو دليل على وجود ماضٍ جيولوجي عنيف، على حد قول برايسير الذي أردف قائلًا إن شوبف انتقى عينات بعينها ليبرز أفكاره، وأخفى عينات أخرى كانت تبدو مماثلة سطحيًّا، ولكنها رسميًّا غير بيولوجية، ويرجح أنها

كلها تكوَّنَتْ بتأثير الماء الشديد السخونة على الرواسب المعدنية. وتابع كلامه قائلًا إن الستروماتوليتات أيضًا تكوَّنَتْ بعمليات جيولوجية وليست بكتيرية، ولم يكن أمرها أكثر غموضًا من ظهور تموُّجات في الرمال. لم يكن للكربون العضوي بنية ميكروسكوبية على الإطلاق؛ مما جعله لا يختلف عن الجرافيت غير العضوي الذي نجده في كثير من الأماكن الحرارية الأرضية. وفي النهاية، وهو ما عُدَّ بمنزلة دقِّ المسمار الأخير في نعش عالم كان يُعتبَر عظيمًا في وقتٍ ما، قال طالبٌ سابقٌ لدى شوبف إنه يتذكَّر أنه حين كان طالبًا بالجامعة أجبره شوبف على إصدار تأويلات مشكوك فيها. بدا الأمر وكأن شوبف قد تحطَّمَ تمامًا.

لكن شوبف لم يكن من طراز الرجال الذين ينهزمون بسهولة، فبرز للمعركة، ورتَّبَ بعض المعطيات ليدلل على آرائه. ثم تقابل مع برايسير على المسرح في مناظرة ربيعية نارية أجرَتْها وكالة ناسا الفضائية في أبريل ٢٠٠٢، ودافع كلٌّ منهما عن قضيته. فبدأ برايسير الأستاذ بجامعة أكسفورد بعجرفته المعهودة، فشجب قضية شوبف قائلًا: «إنها حقًّا تمثيلية حرارية مائية؛ فكلها حرارة وليس فيها الكثير من الضوء.» ومع ذلك، لم يقتنع المحلفون في هذه المناظرة حقًّا بآراء أيٍّ من الطرفين المتنازعين. فبالرغم من وجود شكوك حقيقية بشأن الأصل البيولوجي لأوائل الحفريات الدقيقة، فإن هناك حفريات أخرى — يعود تاريخها إلى مائة مليون سنة فقط بعدها — لم تتعرض إلا لقليل من الدحض؛ بل إن برايسير نفسه كان قد تقدَّم بحفريات رشَّحَها للعرض من نفس ذلك الزمن. إن معظم العلماء، وفيهم شوبف، يُطبِّقون الآن معايير أكثر تشددًا لإثبات صحة المصادر البيولوجية التي لديهم. لكن لا تزال هناك جزئية من العشوائية؛ وهي المتعلقة بالبكتيريا الزرقاء، التي كانت حجر الأساس لشهرة شوبف. وحتى شوبف يعترف بأن الحفريات الدقيقة التي عرضها يرجح أنها ليست من البكتيريا الزرقاء، أو على الأقل ليست أكثر ترجيحًا لأن تكون من البكتيريا الزرقاء عن أي نوع آخر من البكتيريا الخيطية. وهكذا عادت قضية البكتيريا الزرقاء إلى المربع صفر، وهدأت حدة الجدل، مع عدم وجود فكرة أفضل عن نشوء تلك البكتيريا مما كان في البداية.

ذكرت تلك القصة لإظهار مدى صعوبة أن يغوص المرء في أعماق الزمن الجيولوجي، مستخدمًا سجل الحفريات وحده. فحتى إثبات وجود البكتيريا الزرقاء، أو أسلافها على الأقل، لا يثبت أنها تمكنت من تحليل الماء بالفعل. ولعل أسلافها اعتمدت على صورة

من البناء الضوئي أكثر بدائية. لكن هناك طرق أخرى لاستقاء المعلومات من العصور السحيقة، التي يمكن أن يثبت أنها أكثر نفعًا؛ وهي الأسرار المدفونة داخل الكائنات الحية نفسها، في داخل جيناتها الوراثية وأيضًا في تراكيبها الجسمانية، لا سيما في تراكيبها البروتينية.

فعلى مدى ما يزيد عن العقدين أو العقود الثلاثة الماضية، تعرَّضَت التراكيب الجزيئية التفصيلية للأنظمة الضوئية النباتية والبكتيرية للتدقيق والفحص العميق، مع استخدام العلماء لترسانة كبيرة من التقنيات لها أسماء تُثِير الرهبة؛ مما يدل على أن طرق عملها ليست أقل بثًّا للرهبة في القلوب، بدءًا من استخدام جهاز التصوير البلوري بالأشعة السينية إلى استخدام مطياف الرنين بالتدويم الإلكتروني. لا تعنينا الآن كيفية عمل تلك التقنيات المعقدة، بل يكفي أن نعرف أنها استُخدِمت لرسم صور وتكوينات مركبات عملية البناء الضوئي بدرجة تقارب الوضوح الذري؛ وإن كانت للأسف لا تصل إليها. وحتى يومنا هذا تستعر المجادلات في الاجتماعات، ولكنها مجادلات تخص التفصيلات. وأثناء تأليفي لهذا الكتاب، كنت قد رجعت توًّا من لقاء للمناقشة في الجمعية الملكية بلندن، وكان اللقاء ثريًّا بالجدل عن المواضع المحددة لخمس ذرات مهمة في مركب إنتاج الأكسجين. وسرعان ما صارت المجادلات ذات جانبين أحدهما سطحي والآخر عميق. فأما الجانب العميق فلأن المواضع المحددة للذرات تحدد الآلية الكيميائية الدقيقة التي يتم بمقتضاها تحليل الماء، وتُعَدُّ معرفة هذا الأمر هي الخطوة المفتاحية لحل أزمة الطاقة العالمية. وأما الجانب السطحي فهو أن مشاجرات العلماء في هذا الصدد كانت عن تحديد مواضع تلك الذرات الخمس داخل مسافة أقطار قليلة للذرة؛ أي بضعة أنجسترومات (أي أقل من واحد على المليون من المليمتر). ومما يثير دهشة الجيل الأكبر سنًّا من الباحثين، أنه لا يُوجَد إلا القليل من الخلاف بشأن مواضع جميع الذرات الأخرى التي تخص النظام الضوئي ٢ وعددها ٤٦٦٣٠ ذرة، والتي حدَّدها فريق جيم باربر في جامعة إمبريال كوليدج في عام ٢٠٠٤، بل وحُدِّدَتْ في وقت أحدث بتفصيل أكثر.

صحيح أن تلك الذرات القليلة المتبقية لا يزال مطلوبًا تحديد مواضع استقرارها النهائية، إلا أن المعمار الأكبر للنظامين الضوئيين، الذي تم التلميح إليه على مدى أكثر من عقد مضى، قد صار الآن أمرًا بسيطًا، وهناك كتب تتحدث عن تاريخ هذين النظامين التطوري. ففي عام ٢٠٠٦ أظهر فريق صغير قادَهُ بوب بلانكنشيب، الذي صار اليوم أستاذًا متميزًا في جامعة واشنطن، بمدينة سانت لويس الأمريكية، أن النظامين الضوئيين

محفوظان جيدًا بشكل رائع في البكتيريا.[٧] وبالرغم من المسافات التطوُّرية الشاسعة بين المجموعات المختلفة من البكتيريا، فإن التراكيب الأساسية للنظامين الضوئيين متماثلة تقريبًا، لدرجة إمكان مطابقتهما مكانيًّا بوضع أحدهما فوق الآخر باستخدام الكمبيوتر. وفضلًا عن هذا، فقد أكَّدَ بلانكنشيب وجود رابطة أخرى كان الباحثون يشكُّون في وجودها زمنًا طويلًا؛ وهي أن النظامين الضوئيين (١ و٢) يتشاركان أيضًا في التراكيب الأساسية، ومن المؤكد تقريبًا أنهما نشآ من سلف واحد منذ زمن بعيد جدًّا.

بتعبير آخر نقول إنه كان هناك سابقًا نظام ضوئي واحد. وفي وقتٍ ما حدث ازدواج لأحد الجينات لإنتاج نظامين ضوئيين متماثلين، ثم تباعد النظامان ببطء أحدهما عن الآخر تحت تأثير الانتقاء الطبيعي، بينما احتفظا بتشابه تركيبيٍّ وثيق فيما بينهما. وفي نهاية الأمر اقترن النظامان معًا ضِمْنَ المخطط Z المتعلق بالبكتيريا الزرقاء، ثم وصلا فيما بعد إلى النباتات والطحالب، وتحديدًا في حبيبات الكلوروفيل. ولكن هذا السرد البسيط يخفي معضلة عجيبة، فازدواج نظام ضوئي بدائي لا يحل مشكلة البناء الضوئي الأكسجيني مطلقًا؛ إذ لا يمكن أن تقرن بين جاذب قوي للإلكترونات ودافع قوي لها مطلقًا. وقبل أن يتمكَّن البناء الضوئي من ممارسة عمله، يجب على كلا النظامين أن يتباعدا في الاتجاهين المضادين، وحينئذٍ فقط يمكنهما أن يترابطا معًا بشكل مفيد. ومن ثم يكون السؤال: ما تتابع الأحداث الذي يمكن أن يباعد بين النظامين، فقط لكي يعيد ربطهما معًا كشريكين حميمين ولكن متضادين، تمامًا مثل ذكر وأنثى حيوان ما، يُعاد تزويجهما معًا، بعد أن كانا قد خرجا في السابق منفصلين من بويضة واحدة؟

إن أفضل وسيلة للوصول إلى الإجابة هي أن ننظر إلى النظامين الضوئيين أنفسهما. فهما يترابطان ضمن المخطط Z في البكتيريا الزرقاء، ولكن فيما عدا هذا فإن لديهما تاريخين تطوريين متباعدين بشكل يثير الاهتمام. فدَعْنا الآن ننحي جانبًا التساؤل عن المصدر الذي جاء منه النظامان الضوئيان أصلًا، ونلقي نظرة سريعة على توزيعهما الحالي في العالم البكتيري؛ فبعض مجموعات البكتيريا لديها النظام الضوئي ١ فقط، ولدى مجموعات أخرى النظام الضوئي ٢ فقط. وكل نظام ضوئي يعمل بنفسه ليحقق غايات مختلفة، وتقدِّم لنا مهمتهما المحددة فكرة دقيقة عن الكيفية التي نشأ بها البناء الضوئي الأكسجيني في البداية.

ففي البكتيريا، يفعل النظام الضوئي ١ بالضبط ما يفعله في النباتات. فهو يسحب إلكترونات من مصدر غير عضوي ويعمل كالبائع المتجول السابق الإشارة إليه ولكن

على المستوى الجزيئي؛ إذ يدفع بتلك الإلكترونات بقوة إلى ثاني أكسيد الكربون لصنع السكريات. وما يختلف هنا هو المصدر غير العضوي للإلكترونات. فبدلًا من الماء، الذي لا يستطيع النظام الضوئي ١ التعامل معه مطلقًا، يسحب ذلك النظام الإلكترونات من كبريتيد الهيدروجين أو الحديد، وكلاهما يُعتبَر هدفًا أسهل من الماء بكثير. وفي نفس الوقت، فإن مساعد «البائع المتجول» الجزيئي الآخر، وهو جزيء NADPH، يمكن أيضًا أن يتكوَّن بالكيمياء وحدها، على سبيل المثال: في الفوهات الحرمائية التي شرحناها في الفصل الأول. هنا أيضًا يُستخدَم جزيء NADPH لتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى سكريات عن طريق منظومة مشابهة من التفاعلات. ومن ثم، فإن الشيء الوحيد الذي استجدَّ في النظام الضوئي ١ هو ترويض الضوء ليؤدي مهمة كانت الكيمياء تؤديها وحدها في السابق.

ومما يستحق الذكر هنا أيضًا أنه لا يُوجَد شيء خاص فيما يتعلَّق بالقدرة على تحويل الضوء إلى كيمياء؛ فأي مادة صبغية طبيعية يمكنها أن تفعل هذا. إذ تبرع الروابط الكيميائية في تلك الأصباغ في امتصاص فوتونات الضوء، وحينما تفعل هذا يرتفع أحد الإلكترونات إلى مستوى طاقة أعلى، فتستطيع الجزيئات القريبة بسهولة أن تقتنصه. نتيجة لهذا يكون الصبغ قد تأكسد ضوئيًّا؛ فهو بحاجة إلى أحد الإلكترونات ليوازن حساباته، فيأخذه من الحديد أو كبريتيد الهيدروجين. هذا كلُّ ما يفعله الكلوروفيل. والكلوروفيل مادة بورفيرينية، ولا يختلف كثيرًا في صيغته البنائية عن مادة الهيم؛ ذلك الصبغ الحيواني الذي يحمل الأكسجين في دمائنا (ويشكل أحد جزئي هيموجلوبين الدم). وهناك بورفيرينات أخرى كثيرة يمكنها أن تنجز أفعالًا عجيبة مماثلة بالضوء، وأحيانًا ما تكون عواقب ذلك غير محمودة، كما يحدث في أمراض كالبورفيريا.[٨] ومن المهم أن نعرف أن البورفيرينات هي ضمن أكثر الجزيئات تعقيدًا التي تمَّ عزلها من الكويكبات الفضائية وتخليقها أيضًا في المختبرات تحت ظروف تمهيدية حيوية معقولة. بتعبير آخر نقول إن البورفيرينات يُرجَّح أنها تكوَّنَتْ تلقائيًّا على الأرض في أزمنة مبكرة.

اختصارًا، التقط النظام الضوئي ١ صبغًا بسيطًا نسبيًّا هو البورفيرين، وأضاف قدرته الكيميائية التي تتأثر بالضوء تلقائيًّا إلى تفاعلات تحدث في الخلايا البكتيرية على أي حال. وكان نتاج ذلك صورة بدائية من البناء الضوئي يمكنها أن تستخدم الضوء لسحب إلكترونات من مصادر «سهلة» مثل الحديد وكبريتيد الهيدروجين، وتمرير الإلكترونات إلى ثاني أكسيد الكربون لصنع السكريات. ومن ثم؛ فإن تلك البكتيريا تستخدم الضوء لصنع الغذاء.

ماذا عن النظام الضوئي ٢؟ إن البكتيريا التي تستخدم هذا النظام الضوئي تستخدم الضوء لتنجز مهمة مختلفة تمامًا. فلا ينتج هذا النوع من البناء الضوئي مادة عضوية، ولكنه يُحوِّل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية، وهي في الواقع طاقة كهربية يمكن استخدامها لشحن الخلية. وآلية ذلك بسيطة؛ فحينما يصطدم أحد الفوتونات بجزيء من الكلوروفيل، ينفصل منه إلكترون ويرتفع إلى مستوى طاقة أعلى، كما ذكرنا سابقًا، حيث يلتقطه أحد الجزيئات القريبة. ثم يتم تمرير هذا الإلكترون سريعًا من حامل للإلكترونات إلى آخر على طول سلسلة هابطة ناقلة للإلكترونات، مع إطلاق القليل من الطاقة في كل مرة، إلى أن يعود مجددًا إلى مستوى طاقة أقل. ويتم التقاط بعضٍ من الطاقة المنطلقة في هذه العملية لإنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين. وفي النهاية، يعود الإلكترون الذي أضناه الجهد إلى نفس الكلوروفيل الذي خرج منه في البداية، وبهذا تتم دورة كاملة. ومختصر القول إن الضوء يُسبِّب انفصال إلكترون ورفعه إلى مستوى طاقة عالٍ، وحينما يرجع لأسفل إلى مستوى «مستقر» فإن الطاقة المنطلقة يتم التقاطها لتكوين ثلاثي فوسفات الأدينوسين؛ وهو نوع من الطاقة التي يمكن أن تستعملها الخلية. فهي إذن بمنزلة دورة كهربية تُشحَن بالضوء.

من أين جاءت هذه الدورة؟ نقول مجددًا إنها جاءت من مصادر متعددة هي الأخرى. إن سلسلة نقل الإلكترونات مماثلة تقريبًا لتلك المستخدمة في التنفُّس، التي نشأت وتطوَّرت في الفوهات كما رأينا في الفصل الأول، فكأنها استُعِيرَتْ منها لأداء غرض أكثر حداثة قليلًا. ففي التنفس، كما لاحظنا، يتم نزع الإلكترونات من الغذاء وتمريرها في نهاية الأمر إلى الأكسجين لتكوين الماء. ويتم استخدام الطاقة المنطلقة لتوليد ثلاثي فوسفات الأدينوسين. وفي هذا النوع من البناء الضوئي يحدث نفس الشيء؛ إذ يتم تمرير الإلكترونات عالية الطاقة على طول سلسلة، ولكن ليس إلى الأكسجين، وإنما إلى نوع «جشع» (مؤكسِد) من الكلوروفيل. وكلما كان الكلوروفيل أكثر قدرة على «نزع» الإلكترونات (أي كلما كان أقرب إلى الأكسجين في طبيعته الكيميائية) كانت السلسلة أكثر كفاءة، وهي تمتص الإلكترونات أولًا بأول وتسحب طاقتها منها. والميزة الكبيرة هي أن تلك العملية لا تحتاج إلى وقود، ولا غذاء، على الأقل لتوفير الطاقة (ولكن الطاقة مطلوبة لتركيب جزيئات عضوية جديدة).

وكاستنتاج عام نقول إن النوعين الأكثر بساطة من البناء الضوئي يشبهان الفسيفساء في طبيعتهما. وكلا النوعين أوصلا محولًا جديدًا للطاقة؛ هو الكلوروفيل، إلى

آلية جزيئية موجودة بالفعل. ففي إحدى الحالتين تُحوِّل هذه الآليةُ ثاني أكسيد الكربون إلى سكريات، وفي الحالة الأخرى تنتج ثلاثي فوسفات الأدينوسين. أما عن الكلوروفيل فمن المرجح تكوُّن أصباغ بورفيرينية مشابهة على الأرض في الأزمنة المبكرة تلقائيًّا، ثم تكفل الانتقاء الطبيعي بالباقي. وفي كلتا الحالتين يؤدي حدوثُ تغيراتٍ طفيفة في بنية الكلوروفيل إلى تعديل الطول الموجي للضوء الممتص، ومن ثم الخصائص الكيميائية. كل هذه التغيرات تُعدِّل كفاءة العمليات التي تحدث تلقائيًّا، وإن كانت في بادئ الأمر يَشُوبها الكثير من الهدر. ويكون الناتج الطبيعي هو نشوء نمط «بخيل جشع» من الكلوروفيل لتخليق ثلاثي فوسفات الأدينوسين في بعض أنواع البكتيريا الحرة، ونمط «البائع المتجول» من الكلوروفيل لصنع السكريات في البكتيريا التي تعيش بالقرب من موارد كبريتيد الهيدروجين أو الحديد. ولكن لا يزال السؤال الأساسي ماثلًا دون جواب: كيف ترتبط كل تلك العوامل معًا في المخطط Z للبكتيريا الزرقاء؛ لكي تحلل الوقود النهائي، وهو الماء؟

الإجابة القصيرة عن السؤال هي: لا نعرف على وجه التأكيد. هناك طُرُق للتوصُّل إلى إجابة محددة، لكنها للأسف لم تفلح. فمثلًا، يمكننا بشكل منظم أن نقارن ونباين الجينات المتعلقة بالنظامين الضوئيين في البكتيريا؛ لبناء شجرة جينية تدل على أسلاف النظامين الضوئيين. إلا أن تلك الأشجار الجينية لا معنى لها فيما يخص الحياة البكتيرية بسبب حقيقة تخص تلك الحياة؛ وهي الجنس. فالجنس في عالم البكتيريا يختلف تمامًا عن الجنس في عالم الإنسان مثلًا؛ ففي عالم البشر تُتوارَث الجينات عَبْر الأجيال خطوة بخطوة؛ مما يُشكِّل شجرة عائلية واضحة محددة جيدة التنظيم. أما البكتيريا فتنشر جيناتها الوراثية بشكل مفرط دون أن تلقي بالًا لجهود خبراء الأنساب والجينات الوراثية. وتكون نتيجة هذه الفوضى هي شكل أقرب إلى الشبكة العنكبوتية وليست شجرة على الإطلاق؛ حيث تنتهي جينات بعض البكتيريا عند بكتيريا أخرى لا علاقة لها بها بالمرة. وهذا يعني أنه ليس لدينا دليل جيني حقيقي على الكيفية التي تمَّ بها تجميع النظامين الضوئيين ضمن المخطط Z.

لكن هذا لا يعني أننا لا نستطيع أن نعطي أي إجابة. إن القيمة الكبيرة للفرضيات النظرية في العلوم هي أنها تلجأ إلى القيام بقفزات تخيلية إلى المجهول، فتقترح زوايا وتجارب جديدة يمكن أن تؤكِّد الافتراضات أو تُفنِّدها. وفيما يلي واحدة من أفضل تلك

الفرضيات؛ وهي فكرة جميلة من جون أَلِن أستاذ الكيمياء الحيوية في كلية كوين ماري بجامعة لندن وصاحب العقل المبدع. تحدثت عن أَلِن في ثلاثة كتب متتابعة، وفي كل مرة كنتُ أقدِّم فكرة إبداعية مختلفة صادرة عنه. وفرضيته هي مثل أفضل الأفكار في العلوم، تتميَّز بالبساطة التي تُمزِّق سريعًا طبقاتٍ عدَّةً من التعقيد. قد لا تكون صحيحة؛ فليست كل الأفكار الكبيرة في العلوم صحيحة. ولكن حتى إذا كانت خطأً، فإنها تُظْهِر كيف «يُحتمَل» أن تكون الأمور قد صارت إلى ما هي عليه، كما أنها عن طريق اقتراح التجارب المطلوبة لاختبار تلك الأمور، ترشد الباحثين إلى الطريق الصحيح. إنها تُقدِّم الفكرة الثاقبة والحافز في الوقت ذاته.

يقول أَلِن إن كثيرًا من أنواع البكتيريا تشغل الجينات الوراثية أو تُعطِّلها استجابةً لتغيُّرات في بيئتها؛ وهذه في حدِّ ذاتها تُعَدُّ من المعلومات العامة، ومن أهم المفاتيح البيئية المسئولة عن تشغيل الجينات وتعطيلها وجود المواد الخام أو غيابها. وبصفة عامة، فإن البكتيريا لا تُهْدِر الطاقة في بناء بروتينات جديدة بهدف معالجة مواد خام إذا لم تجد أيًّا منها حولها، بل إنها تكتفي بإيقاف أنشطتها إلى حين صدور إشعار آخر. ومن ثم؛ فإن أَلِن يتخيَّل بيئةً متقلبةً — ربما كانت في شكل ستروماتوليتات في البحار الضحلة، أو عند فوهة حرمائية تُطلِق كبريتيد الهيدروجين إلى العالم. وتتفاوت الأحوال تبعًا لتأثير المد والجزر البحري، والتيارات الأخرى، والوقت من العام، والنشاط المائي الحراري وغيرها. والعامل الحاسم هو وجوب أن يكون لبكتيريا أَلِن الافتراضية كلا النظامين الضوئيين، كما هو حال البكتيريا الزرقاء في يومنا هذا، ولكن تلك البكتيريا تختلف عن البكتيريا الزرقاء في كونها تستخدم أحد النظامين فقط في كل مرة. فحينما يكون كبريتيد الهيدروجين موجودًا، فإن البكتيريا تشغل النظام الضوئي ١ وتستخدمه لإنتاج المادة العضوية من ثاني أكسيد الكربون، ويمكنها أن تأخذ هذه المادة الجديدة وتستخدمها في النمو والتكاثر، وهكذا. ولكن إذا تغيَّرَتِ الظروف، وصارت الستروماتوليتات بغير مواد خام فإن تلك البكتيريا تنتقل إلى تشغيل النظام الضوئي ٢. وحينئذٍ تكف تلك البكتيريا عن صنع مواد عضوية جديدة (فهي لم تَعُدْ تنمو ولا تتكاثر)، ولكن يمكنها الحفاظ على وجودها عن طريق استخدام ضوء الشمس في صنع ثلاثي فوسفات الأدينوسين مباشرة إلى أن تتحسَّن الأحوال. لكلا النظامين الضوئيين فائدته، وكلٌّ منهما نشأ وتطوَّرَ من خلال سلسلة من الخطوات البسيطة كما رأينا سابقًا.

ولكن ماذا يحدث إذا اندثرت إحدى الفوهات الحرمائية، أو أدَّتِ التياراتُ الهوجاء إلى تغيُّرات طويلة الأمد في البيئة؟ لا بد حينئذٍ أن تعتمد البكتيريا على دورة الإلكترونات

للنظام الضوئي ٢ في أغلب أحوالها. ولكن هنا تكمن مشكلة محتملة؛ إذ يمكن أن تنسَدَّ الدورة بإلكترونات من البيئة، حتى إذا حدث هذا ببطء في محيطها الفقير في الإلكترونات. إن دورة الإلكترونات تشبه إلى حدٍّ ما لعبة تمرير الطرود، فإما أن يكون لدى حامل الإلكترونات إلكترون وإما لا، تمامًا مثل الطفل؛ فإما أن يكون لديه طرد حينما تتوقَّف الموسيقى وإما لا. ولكن تخيَّلِ الآن مشرفًا وغدًا على هذه اللعبة معه كومة من الطرود، فهو مستمر في تمريرها إلى دائرة الأطفال الواحد تلو الآخر. وفي نهاية اللعبة يكون لكل طفل طرد واحد، ولا يمكن لأحد منهم أن يمرر طرده لمن يليه؛ فتتوقف اللعبة بسبب حالة الارتباك تلك.

نفس هذه الحالة تنطبق في أغلبها على النظام الضوئي ٢؛ إذ تكمن المشكلة في ضوء الشمس، لا سيما في تلك الأيام التي سبقَتْ وجود طبقة الأوزون؛ حيث كان المزيد من الإشعاع فوق البنفسجي يشق طريقه وصولًا إلى مستوى سطح البحر. ولا يقتصر تأثير الأشعة فوق البنفسجية على تحليل الماء، ولكن يمكن أيضًا أن تفصل الإلكترونات عن الأملاح المعدنية والمعادن الذائبة في المحيطات، وعلى رأسها المنجنيز والحديد. وهذا يُوضِّح بالضبط نوع المشكلة التي تحبط لعبة تمرير الطرود التي لدينا؛ إذ يتسرَّب بعضٌ من الإلكترونات إلى دورة الإلكترونات دون استعداد لها.

لا يُوجَد الحديد ولا المنجنيز بتركيزات عالية في مياه البحار اليوم؛ لأن مياه المحيطات تُأكسِد ما فيها تمامًا من هذين المعدنين، ولكن في الأزمنة الغابرة كانا بكميات وفيرة؛ فالمنجنيز، على سبيل المثال، يُوجَد بكميات هائلة في قاع البحر على شكل عقيدات عجيبة مخروطية الشكل، تراكمت على مدى ملايين السنين حول أشياء مثل أسنان أسماك القرش، وهي واحدة من قليل من الأشياء الحيَّة التي يمكنها أن تتحمَّل الضغوط الهائلة للماء عند قاع المحيط. ويُعتقَد أن هناك تريليون طنٍّ من العقيدات الغنية بالمنجنيز مبعثرة على قيعان البحار، وهو مخزون هائل ولكنه غير اقتصادي. وحتى المخزونات الأكثر اقتصادية مثل حقول المنجنيز الهائلة في كالاهاري بجنوب أفريقيا (وتحتوي على كمية أخرى مقدارها ١٣٫٥ مليار طنٍّ من الخام) فقد ترسَّبَتْ أصلًا في المحيطات منذ ٢٤٠٠ مليون سنة. خلاصة القول إن المحيطات كانت في قديم الزمان مليئة بالمنجنيز.

وبالنسبة للبكتيريا، يُعَدُّ المنجنيز بضاعة قيِّمة؛ فهو يعمل كمضاد للأكسدة ليحمي الخلايا من التأثير المدمِّر للإشعاع فوق البنفسجي. وحينما تمتص ذرة المنجنيز فوتونًا من الإشعاع فوق البنفسجي فإنها تُطلِق إلكترونًا، فتتأكسد ضوئيًّا، وفي هذه العملية تكون

قد «عادلت» الأشعة. وبهذا تتم «التضحية» بالمنجنيز بدلًا من قطع وأجزاء الخلية الأكثر أهمية، مثل البروتينات والدي إن إيه، التي لولا ذلك لتفتتت بفعل الأشعة؛ ومن ثم ترحب بشِدَّةٍ البكتيريا بوجود المنجنيز لديها. وتكون المشكلة أنه حينما تَفْقِد ذراتُ المنجنيز إلكترونًا؛ فمن المرجَّح دائمًا أن يتلقَّفه ذلك النوع «البخيل الطماع» من الكلوروفيل في النظام الضوئي ٢. ومن ثم تنسد الدائرة تدريجيًّا بالإلكترونات، تمامًا مثلما غرقت دائرة الأطفال — التي ذكرناها — في الطرود. وما لم يكن ثمة وسيلة لاستنزاف الإلكترونات الزائدة التي تعوق الدائرة فإن النظام الضوئي ٢ يصير أقل كفاءة رويدًا رويدًا.

ولكن كيف يمكن أن تستنزف البكتيريا الإلكترونات من النظام الضوئي ٢؟ هنا تكمن عبقرية فرضية أَلِن كلها؛ فالنظام الضوئي ٢ يكون قد انسَدَّ بالإلكترونات، بينما يبقى النظام ١ عاطلًا عن العمل بسبب نقص الإلكترونات لديه. إن كل ما تحتاجه البكتيريا هو تعطيل مفتاح التشغيل الذي يمنع عمل كلا النظامين الضوئيين في الآن عينه، إما بطريقة فسيولوجية وإما عن طريق طفرة من الطفرات. فماذا يحدث حينئذ؟ تدخل الإلكترونات النظام الضوئي ٢ مجلوبة من ذرات المنجنيز المؤكسدة، ثم يتم إطلاقها إلى مستوى عالٍ من الطاقة، بينما يمتص النوع «البخيل الطماع» من الكلوروفيل شعاعًا من الضوء. ومن هنا يتم تمريرها لأسفل عَبْر سلسلة نقل الإلكترونات، مع استخدام الطاقة المنطلقة لتوليد قليلٍ من ثلاثي فوسفات الأدينوسين، ثم تحدث هنا عملية التغيير. فبدلًا من العودة إلى النظام الضوئي ٢ المعاق بكثرة الإلكترونات، يقوم النظام الضوئي ١ النشط بالتقاط تلك الإلكترونات الجديدة الزائدة التي هو متعطِّش لها. ثم يتم إطلاق الإلكترونات لمستوى مرتفع من الطاقة مجددًا، مع امتصاص نوع «البائع المتجول» من الكلوروفيل لشعاع من الضوء. ومن ثم — بطبيعة الحال — يتم تمرير الإلكترونات في نهاية الأمر إلى ثاني أكسيد الكربون، لتكوين مادة عضوية جديدة.

هل هذا الكلام يبدو مألوفًا لك؟ لقد شرحتُ توًّا المخطط Z مجددًا؛ إذ يمكن بواسطة طفرة وراثية واحدة ربط النظامين الضوئيين في سلسلة واحدة، مع تمرير الإلكترونات من ذرات المنجنيز عن طريق المخطط Z بأكمله إلى ثاني أكسيد الكربون لصنع السكريات. وهكذا فما تبدو الآن فقط كعملية شديدة الالتفاف والتعقيد يمكن فجأة جعلها ممكنة، بل حتمية، وذلك بإجراء طفرة جينية واحدة. هذا منطق سليم ومعقول؛ فالقطع الجزيئية كلها في مواضعها وكلها تؤدي وظيفة كوحدات مفردة، كما أن الضغوط البيئية معقولة ويمكن توقُّعها. ولم يحدث من قبل أن أدَّتْ طفرةٌ واحدةٌ إلى إحداث مثل هذا الفارق الكبير في العالم.

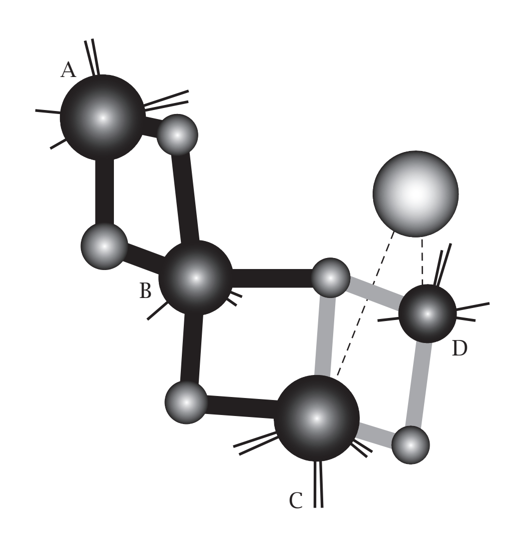
الأمر يستحق تلخيصًا سريعًا لتقدير الصورة الكبيرة بالكامل. في البداية كان هناك نظام ضوئي واحد، يُرجَّح أنه استخدم ضوء الشمس لاستخلاص الإلكترونات من كبريتيد الهيدروجين ودفعها إلى ثاني أكسيد الكربون لصنع السكريات. وفي مرحلةٍ ما صار الجين مزدوجًا، ربما لدى أحد أسلاف البكتيريا الزرقاء. وتباعد النظامان الضوئيان وصار لكلٍّ منهما استخدام مختلف.[٩] فاضطلع النظام الضوئي ١ بأداء ما كان يفعله في السابق، بينما تخصص النظام الضوئي ٢ في توليد ثلاثي فوسفات الأدينوسين من ضوء الشمس عن طريق دائرة إلكترونات. وكان يتم تشغيل النظامين الضوئيين أو إيقافهما تبعًا لحالة البيئة، ولكن لم يحدث قط أن تمَّ تشغيل النظامين معًا في آنٍ واحد. وبمرور الزمن، مع ذلك، يقع النظام الضوئي ٢ في مشكلة نتجت عن خصائصٍ دائرة الإلكترونات؛ فأي زيادة فيما يَرِد من الإلكترونات من البيئة يؤدِّي إلى إرباك الدائرة وإعاقتها. ومن المرجح أنه كان ثمة ورود بطيء ومستمر من الإلكترونات من ذرات المنجنيز لتستخدمه البكتيريا في حماية نفسها من الإشعاع فوق البنفسجي. وهناك حل لهذه المشكلة يتمثَّل في تثبيط عملية التحويل بين النظامين الضوئيين، مع تمكينهما من العمل في آنٍ واحد. وبهذا تتدفَّق الإلكترونات من المنجنيز، خلال كلا النظامين الضوئيين، إلى ثاني أكسيد الكربون، وذلك عن طريق مسار مُعقَّد يُعتَبَر إرهاصًا للمخطط Z الملتف بكل تفصيلاته الغريبة.

والآن صِرْنا على بُعْد خطوة واحدة من البناء الضوئي الأكسجيني بكل عنفوانه؛ فنحن نسحب الإلكترونات من المنجنيز، وليس من الماء. كيف إذن يحدث التحوُّل النهائي المطلوب؟ الإجابة المدهشة هي أننا في غير حاجة إلى شيءٍ مُعيَّن لإحداث التغيير.

يُعتبَر المُركَّب المطلق للأكسجين مثل كسارة البندق؛ إذ يكبل الماء حتى يتم ضربه وإطلاق الإلكترونات منه الواحد تلو الآخر. وحينما تتم إزالة الإلكترونات ينطلق الأكسجين، ذلك الناتج الثانوي الثمين، إلى العالم. وذلك المركب المطلق للأكسجين في حقيقته أحد مكونات النظام الضوئي ٢، ولكنه يستقر عند آخر حافته، مواجهًا للعالم الخارجي، ومعطيًا انطباعًا بأنه «مثبت» في موضعه، وهو صغير بدرجة عجيبة. ويتكون ذلك المركب من عنقود من أربع ذرات من المنجنيز وذرة واحدة من الكالسيوم، ترتبط كلها معًا بشبكة من ذرات الأكسجين. هذا كل ما في الأمر.

على مدى سنوات، كان العالم قويَّ الشكيمة، مايك راسل — الذي صادفناه في الفصلين الأول والثاني — يجادل قائلًا إن بنية ذلك المُركَّب مشابهة بشكل ملحوظ

لبعض المعادن التي تتأثَّر بحرارة الفوهات الحرمائية، مثل خام الهولنديت أو منجنيت الكالسيوم النفقي. ولكن حتى عام ٢٠٠٦ لم نكن نعلم بنية عنقود المنجنيز هذا بالتحليل الذري، وكان راسل مجرد صوت في البرية، ولكننا اليوم نعرف تلك البنية. ومع أن راسل لم يكن مُصيبًا تمامًا، فإن مفهومه بصفة عامة كان صحيحًا تمامًا. والصيغة البنائية التي كشف عنها فريق كان يرأسه فيتال ياشاندرا في بيركلي تحمل تشابهًا واضحًا للأشكال المعدنية التي افترضها راسل (انظر الشكل ٣-٤).



شكل ٣-٤: البنية المعدنية القديمة للمُركَّب المطلق للأكسجين: أربع ذرات من المنجنيز (موضَّحة بالحروف من A إلى D) ترتبط بالأكسجين ضمن شبكة، مع وجود ذرة من الكالسيوم قريبة منها. وقد تَمَّ الكشف عن هذه البنية باستخدام التصوير البلوري بالأشعة السينية.

لا نعرف ما إذا كان المركب المطلق للأكسجين في الأصل مجرد قطعة من المعدن اندمجت ضمن النظام الضوئي ٢ أم غير ذلك. فربما صارت ذرات المنجنيز مرتبطة بالأكسجين في شكل شبكة أثناء أكسدتها بالإشعاع فوق البنفسجي؛ مما أدى إلى تكوُّن بلورة دقيقة في نفس الموقع ونموها.[١٠] وربما أدَّى قُرْب ذلك العنقود من الكلوروفيل،

أو من قطع البروتين القريبة، إلى تغيير شكله بطريقة ما؛ مما أدى إلى تحسين وظيفته. ولكن أيًّا كان أصل ذلك العنقود، فهناك قَدْر كبير من الأحداث التصادفية المتعلقة به. فهو قريب إلى حدٍّ بعيد من التركيب المعدني لدرجة يتعجَّب معها المرء من كونه نتاجًا لعملية بيولوجية. وهو مثل قليل من العناقيد المعدنية الأخرى التي تُوجَد في قلب الإنزيمات، فنكاد نكون على يقين من أنه ارتداد إلى الأحوال التي كانت موجودة منذ مليارات السنين في الفوهات الحرمائية. وذلك العنقود المعدني، أغلى الجواهر الثمينة، تركَّزَ في مادة بروتينية، واحتفظت به وصانَتْه البكتيريا الزرقاء على طول الزمان.

وأيًّا كانت طريقة تكوُّن ذلك العنقود الصغير من ذرات المنجنيز فإنه فتح عالمًا جديدًا، ليس للبكتيريا التي احتفظت به منذ زمن البداية فحسب، ولكن لجميع صور حياة الكائنات على ظهر الأرض. فبمجرد تكوُّن ذلك العنقود الصغير من الذرات، بدأ في تحليل الماء، وبدأت ذرات المنجنيز المؤكسَدة الأربع بتجميع شراهتها الطبيعية لانتزاع الإلكترونات من الماء، ومن ثم إطلاق الأكسجين كناتج ثانوي. ويُلاحَظ أن تحليل الماء الذي تَمَّ حفزه بفعل الأكسدة المستمرة للمنجنيز بتأثير الإشعاع فوق البنفسجي، لا بد أنه كان بطيئًا في بادئ الأمر. ولكن بمجرد أن صار العنقود مرتبطًا بالكلوروفيل بدأت الإلكترونات في التدفُّق. ومع تأقلم الكلوروفيل مع هذه العملية ازدادت سرعته، وبدأ سحب الماء وتحليله، وسحب إلكتروناته وإخراجها، وطرد الأكسجين. وهذا التدفق المانح للحياة للإلكترونات — الذي بدأ ببطء ثم تسارع كالفيضان الغامر — وراء جميع مظاهر ازدهار الحياة على الأرض. إننا يجب أن نشكر تلك العملية الحيوية مرتين: مرة لأنها مصدر جميع أنواع الغذاء الذي نأكله، ثم مجددًا لما انطلق بسببها من الأكسجين الذي نحتاجه لحرق الغذاء الذي يبقينا أحياء.

تلك العملية هي أيضًا مفتاح حل أزمة الطاقة العالمية؛ فلا حاجة بنا لوجود نظامين ضوئيين؛ إذ لا يعنينا صنع المادة العضوية في هذا الصدد. بل نحتاج فقط إلى منتجين ينطلقان من تحليل الماء — وهما الأكسجين والهيدروجين — فجعلهما يتفاعلان معًا مجددًا يُولِّد كل الطاقة التي نحتاجها، والنفاية الوحيدة الناتجة هي الماء. وبتعبير آخر، نقول إننا بذلك العنقود الصغير من المنجنيز يمكننا استخدام طاقة الشمس في تحليل الماء، ثم نجعل المكونين الناتجين يتفاعلان معًا مرة أخرى لتوليد الماء مجددًا؛ ما يمكن تسميته اقتصاد الهيدروجين. فلا مزيد من التلوث، ولا مزيد من أنواع الوقود الحفري، ولا مزيد من أضرار غازات الكربون ومركباته الضارة، ولا مزيد من الاحترار العالمي

الذي تسبب فيه البشر، وذلك إذا استثنينا احتمالات حدوث بعض الانفجارات. وإذا كان ذلك العنقود الصغير من الذرات قد غيَّرَ تركيبة العالم منذ زمن بعيد، فإن معرفتنا لتركيبته الذرية لا بد أن تكون الخطوة الأولى نحو تغيير عالمنا اليوم. وأثناء كتابتي لهذا الفصل، يتسابق الكيميائيون في أنحاء العالم في تخليق ذلك العنقود المنجنيزي الدقيق في المعمل، أو أي شيء مشابه له يحقق الفائدة مثله. وإنني مُوقِن أنهم سريعًا ما سيحققون النجاح. حينئذٍ لن يمر وقت طويل حتى نتعلم أن نعيش حياتنا بقدر من الماء وشيء من أشعة الشمس.

الفصل الرابع

الخلية المعقدة

نتاج مصادفة قدرية

«عالم النبات هو من يستطيع أن يعطي أسماء متشابهة لنباتات متشابهة، وأسماء مختلفة لنباتات مختلفة؛ حتى تكون معروفة ومميزة لكل إنسان.» هذا ما قاله العالم السويدي الكبير في علم تصنيف الكائنات كارولوس لينيوس، الذي كان هو نفسه عالم نبات. وقد نعتبر هذا الكلام بدائيًّا بعض الشيء أو طموحًا محدودًا في يومنا هذا، إلا أن لينيوس وهو يعمل على تصنيف العالم الأرضي الحي تبعًا لصفات الأنواع أرسى قواعد علم الأحياء الحديث. وقد كان بالتأكيد فخورًا بإنجازاته، حتى إنه كان يسعده أن يقول: «الله يخلق، ولينيوس يُصنِّف.» ولا شكَّ أنه كان سيسعد إذا علم أن العلماء سيظلُّون — حتى يومنا هذا — يستخدمون نظامه التصنيفي الذي يُقسِّم الكائنات الأرضية تحت عناوين: المملكة، والشعبة، والطائفة، والجنس، والنوع.

هذه الرغبة في التصنيف، واتباع النظام بدلًا من الفوضى، بدأت تجعل العالم الذي حولنا ذا معنى، وصارت أساسًا لعدد من العلوم التي تنفعنا. فأين يكون موقع علم الكيمياء بدون الجدول الدوري للعناصر؟ أو الجيولوجيا بدون معرفة الحِقَب والعصور؟ ولكن هناك أمر مختلف فيما يتعلق بعلم الأحياء. ففي علم الأحياء فقط لا يزال هذا التصنيف للكائنات جزءًا نشطًا من الأبحاث الجارية. وقد صارت الكيفية التي تُبنى بها «شجرة الحياة» — تلك الخريطة الكبيرة التي تُبيِّن العلاقات بين جميع الكائنات الحية — مصدرًا للحقد، بل والغضب بين علماء يُفترَض فيهم دماثة الأخلاق. وقد نشر أحد

العلماء واسمه فورد دوليتل، ويُعتبَر من أكثر العلماء رقة وهدوءًا، مقالة يُعبِّر في عنوانها عن هذا الاتجاه، وهو «تشذيب شجرة الحياة».

وليست المشكلة فيمن كانوا يُعتبَرون رقيقي الطبع، بل في أمور تتعلق بأكثر الفروق والمميزات أهمية من الناحية المادية. فأغلبنا، مثل لينيوس، لا يزال بالفطرة يُقسِّم العالم إلى نباتات وحيوانات وجمادات، وهي على أي حال الأشياء التي يمكننا أن نراها. أليست هذه الفئات مختلفة بما يكفي؟ إن الحيوانات تضج بالحياة حولنا، مهتدية بأجهزتها العصبية الراقية المعقدة، وتأكل النباتات والحيوانات الأخرى. والنباتات تنتج مادة جسمها من ثاني أكسيد الكربون والماء، مستخدمة طاقة أشعة الشمس، وهي مغروسة في أماكنها فلا حاجة بها إلى المخ. والجمادات خالية من الحياة، حتى إذا كان نمو البلورات قد أقنع لينيوس بأن يضمها إلى تصنيفاته باعتبارها من مظاهر الحياة، في حين أن البلورات ليست حية.

إن جذور وأسس علم الأحياء بوصفها مادة دراسية تنقسم إلى علم الحيوان وعلم النبات، ولم يلتقِ الاثنان قط على مدى أجيال. بل إن اكتشاف أشكال الحياة المجهرية لم يفعل إلا القليل لكسر هذا التقسيم القديم؛ فالحيوانات الدقيقة، مثل الأميبا التي تتحرك حولنا بنشاط، أُدرِجَتْ ضمن المملكة الحيوانية، وأُطلِق عليها فيما بعد اسم الحيوانات الأولية أو الأوليات، بينما أُضِيفَتِ الطحالب الملوَّنة والبكتيريا إلى عالم النباتات. ولو كان لينيوس حيًّا بيننا اليوم وسرَّه أن يجد أن نظامه التصنيفي لا يزال يُستخدَم، لصُعِق عند اكتشافه أنه انخدع كثيرًا بالمظاهر الخارجية. فاليوم ضاقت كثيرًا الفجوة التي نجدها بين النباتات والحيوانات، بينما انفتح بحر واسع بين البكتيريا وبقية صور الحياة المعقدة. وعبور هذا البحر يُسبِّب الكثير من النزاع بين العلماء، ويجعلهم يتساءلون: كيف انتقلت الحياة من بساطة البكتيريا البدائية إلى تعقيد النباتات والحيوانات الراقية؟ هل كان هذا الانتقال مُرجَّح الحدوث، أم غير محتمل الحدوث بشكل مؤكد؟ هل حدث في مكان آخر في الكون الفسيح، أم أن الكون خارج الأرض خالٍ من الحياة؟

وخشية أن يستغلَّ البعض حالة عدم اليقين هذه في الترويج لأفكار غير علمية؛ فقد صدرت أفكار كثيرة جديرة بالتصديق، ولكن تكمن المشكلة في وجود الأدلة والبراهين، وتحديدًا في تأويل الأدلة المتعلقة بالأزمنة السحيقة في القِدَم، وهي أزمنة ربما تعود إلى ٢٠٠٠ مليون سنة مضت حينما نشأتْ أُولى الخلايا المعقدة حسبما يعتقد العلماء. وأعمق الأسئلة يتعلَّق بسبب ظهور الحياة المعقدة دفعة واحدة فقط في تاريخ الحياة على كوكبنا

بأكمله؛ فكل النباتات والحيوانات بلا شك ترتبط بعلاقات فيما بينها، بمعنى أننا جميعًا نتشارك في سلف واحد حسبما يقول العلماء؛ فالحياة المعقدة لم تنبثق بشكل متكرر من البكتيريا في أوقات منفصلة، بمعنى انبثاق النباتات من نوع من البكتيريا، والحيوانات من نوع آخر، والفطريات أو الطحالب من أنواع أخرى. بل على العكس، ففي وقت واحد نشأت خلية معقدة من البكتيريا، واستمرت ذرية تلك الخلية لتنشأ عنها الممالك الكبيرة للحياة المعقدة؛ وهي: النباتات، والحيوانات، والفطريات، والطحالب. وتلك الخلية الأم، أي السلف الأكبر لكل صور الحياة المعقدة، تختلف كثيرًا عن البكتيريا؛ فإذا نظرنا إلى شجرة الحياة، فكأن البكتيريا تشكل جذورها، بينما تشكل الكائنات المعقدة المألوفة أغصانها. ولكن ماذا بشأن جذع الشجرة؟ مع أننا يمكن أن نعتبر الكائنات الأولية وحيدة الخلية، مثل الأميبا، أشكالًا وسيطة؛ فإنها في الواقع ومن نواحٍ كثيرة تُعتبَر معقدة مثل النباتات والحيوانات. إنها بالتأكيد تستقر عند فرع سفلي أدنى، ولكنها مع ذلك تظل فوق مستوى جذع الشجرة.

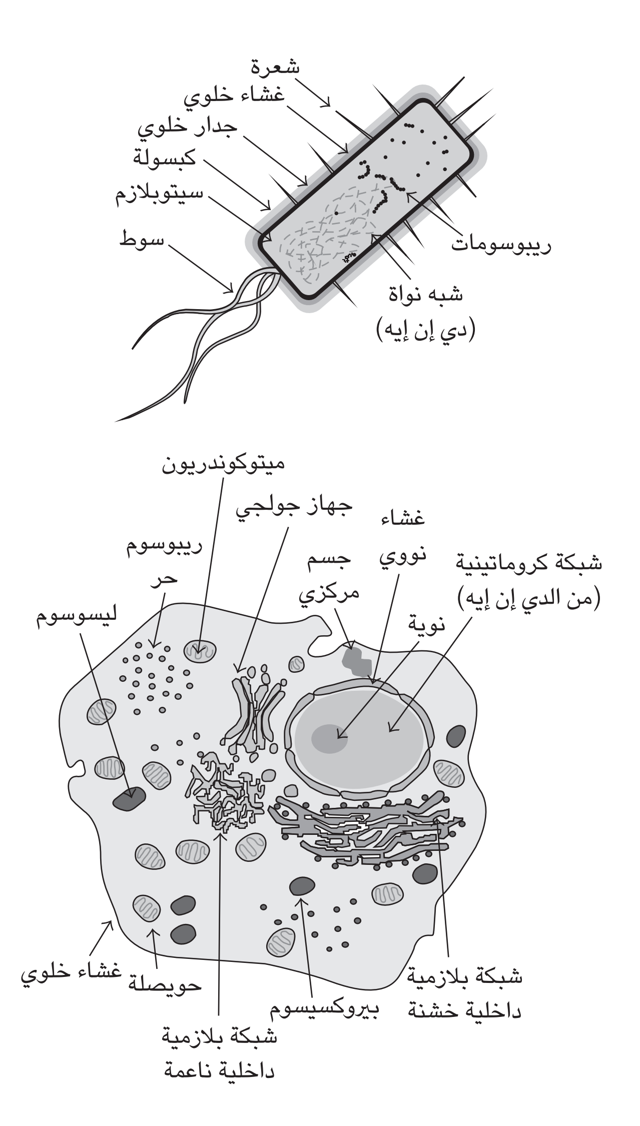
ذلك البون الشاسع بين البكتيريا والكائنات الأخرى الأكثر رقيًّا هو بالأساس مسألة تنظيم على مستوى الخلايا. فمن حيث موروفولوجيتها على الأقل — أي شكلها وحجمها ومكوناتها — تُعتبَر البكتيريا بسيطة؛ فشكلها بسيط عادة، وأغلبها كروي أو عصوي. وهذا الشكل يدعمه جدار خلوي صلب يحيط بالخلية من الخارج، ولا يُوجَد في داخلها سوى القليل لنراه، حتى مع استخدام قوة تكبير المجهر الإلكتروني. فالبكتيريا اختزلت أجسامها لأقل درجة تتفق مع نمط حياتها حر المعيشة، وحياتها تسير في خط واحد لا تَحِيد عنه؛ فكل شيء مسخَّر للتكاثر والتضاعف السريع، والكثير منها يحتفظ بأقل قَدْر ممكن من الجينات الوراثية لتعيش حياتها، ولديها قابلية لأن تنتزع المزيد من الجينات من بكتيريا أخرى حينما تتعرض للضغوط؛ وذلك حتى تدعم احتياجاتها الجينية، ثم تفقد تلك الجينات الزائدة مجددًا عند أقرب فرصة، ويتم نسخ جينوماتها الصغيرة بسرعة. وبعض أنواع البكتيريا يمكنها أن تتضاعف كل ٢٠ دقيقة؛ مما يتيح لها نموًّا مضاعفًا بسرعات مذهلة طالما بقيت المواد الخام اللازمة لذلك، فإذا حصل أحدها — يزن واحدًا على تريليون من الجرام — على ما يكفيه من موارد بغير حدود (وهو أمر مستحيل بالفعل)، يمكنه أن يتكاثر بِحُرِّية حتى يصل وزن مجموع أعداده إلى ما يعادل وزن الكرة الأرضية نفسها في أقل من يومين.

والآن لننظر إلى الخلايا المعقدة، التي تتمتَّع بعنوان يثير الرهبة، وهو حقيقيات النوى eukaryotes. كنت أود أن يكون لها اسم أرقُّ من هذا، وهو على أي حال غير مُعبِّر

عنها بدقة. فكل شيء وأي شيء على ظهر الأرض من جميع صور الحياة المعقدة التي نتحدث عنها هو من حقيقيات النوى. وهذا الاسم مشتق من لفظ يوناني هو eu بمعنى «حقيقي» وkaryon بمعنى «قلب الجوزة» أو «النواة». وهكذا لهذا النوع من الخلايا نوى حقيقية؛ مما يُميِّزها عن البكتيريا، التي تُسمَّى بدائيات النوى prokaryotes بسبب حرمانها من النواة. بالنظر للأمر نجد أن البادئة pro، ومعناها «قبل»، تُعتبَر ذات قيمة توضيحية؛ إذ تدل على أن بدائيات النوى نشأت قبل حقيقيات النوى. وأعتقد أن هذا أمر صحيح بالتأكيد ولكن بعض الباحثين لا يتفقون معي في هذا الرأي. وبغضِّ النظر عن زمن نشوء تلك الكائنات الحية بالضبط فإن وجود النواة يُعَدُّ الفيصل والمظهر المحدد لجميع الخلايا حقيقية النوى. ولا يمكننا أن نأمل في تفسير تطوُّرها بدون أن نفهم كيف ظهرت تلك النواة ولماذا، وعلى العكس من ذلك، لماذا حُرِمَتْ جميع أنواع البكتيريا من وجود النواة؟

النواة هي «مركز القيادة» في الخلية، وهي معبأة بالدي إن إيه؛ المادة الجينية الوراثية. وفضلًا عن وجود النوى في حد ذاتها، هناك أوجه أخرى عدة مميزة للخلايا حقيقية النوى لا تُوجَد في البكتيريا. فالخلايا حقيقية النوى ليس لديها كروموسوم دائري واحد، مثل البكتيريا، ولكن لديها عدد من الكروموسومات المستقيمة التي تكون غالبًا مقترنة في أزواج. كما أن الجينات نفسها ليست مصفوفة على طول الكروموسومات كحبات المسبحة، كما في البكتيريا، ولكنها تنقسم إلى قِطَع وأجزاء، مع وجود مسافات أو امتدادات واسعة من مادة الدي إن إيه غير المشفرة فيما بينها؛ أي إن حقيقيات النوى لديها جينات تأخذ شكل قطع لسبب ما. وفي النهاية، فإن جينات الخلايا حقيقية النوى ليست مكشوفة مثل جينات البكتيريا، ولكنها مغطاة بالبروتينات، وهو نسق يجعلها منيعة ضد العبث والاختراق مثل الأغلفة البلاستيكية الحديثة التي تُغلَّف بها الهدايا.

وخارج نطاق النواة أيضًا، تُعتبَر الخلايا حقيقية النوى عالمًا مستقلًّا بذاته (انظر الشكل ٤-١). وعادة ما تكون تلك الخلايا أكبر بكثير من البكتيريا — بما يصل في المتوسط من عشرة آلاف إلى مائة ألف مرة قَدْر حجم البكتيريا — كما أنها مليئة بأشياء أخرى كثيرة ومتنوعة. ومنها أكداس من الأغشية ووفرة من الحويصلات المغلقة، وهيكل خلوي داخلي ديناميكي يُوفِّر دعمًا بنائيًّا للخلية، وفي نفس الوقت يكون قادرًا على أن ينقض بناءه ثم يُجدِّده داخل الخلية، بما يتيح حدوث تغيرات في شكلها وحركتها. ولعل أهم تلك المكونات هو العضيات (أي الأعضاء الدقيقة الداخلية).



شكل ٤-١: الاختلافات بين الخلايا بدائية النوى، مثل البكتيريا، والخلايا حقيقية النوى المعقدة التي «تُوجَد فيها مكونات داخلية»، وتشمل نواة، وعضيات وتراكيب غشائية داخلية. هذا الرسم بالتأكيد ليس مرسومًا بمقاييس رسم حقيقية؛ إذ يصل حجم حقيقيات النوى في المتوسط من عشرة آلاف إلى مائة ألف مرة قدر حجم البكتيريا.

وتلك الأعضاء المجهرية مكرسة لأداء مهام خاصة في الخلية، تمامًا كما تضطلع الكلى أو الكبد بمهام متخصصة في الجسم البشري. وأكثرها أهمية هي الميتوكوندريا، التي تُعرَف بأنها «محطات توليد الطاقة» في الخلية، التي تُولِّد الطاقة في صورة ثلاثي فوسفات الأدينوسين. وتحتوي الخلية حقيقية النواة في المتوسط على بضع مئات من الميتوكوندريا، ولكن يحتوي بعضها على ما يصل إلى مائة ألف منها. ويقول العلماء إنه فيما مضى كانت تلك الميتوكوندريا بكتيريا حرة المعيشة، ثم وقعت في شَرَك الخلايا الراقية لتؤدي وظائفها فيها، وسنشرح تبعات ذلك بتوسُّع أكثر في هذا الفصل.

هذه مجرد فروق في المظهر. أما في السلوك، فإن الخلايا حقيقية النوى رائعة بنفس الدرجة، كما أنها مختلفة تمامًا عن البكتيريا. ويمكننا القول إن جميع حقيقيات النوى — فيما عدا استثناءات قليلة — لها جنس محدد؛ فهي تولِّد خلايا جنسية مثل المني والبويضات، والتي تندمج معًا لتكوِّن خلية هجينًا (مخصبة) بها نصف عدد الجينات من الأب والنصف الآخر من الأم (وسنذكر المزيد عن هذا في الفصل التالي). وجميع الخلايا حقيقية النوى تنقسم من خلال ممارسة الكروموسومات لما يشبه رقصة الجافوت الفرنسية الساحرة؛ إذ تُضاعِف أعدادها وتصفُّ أنفسها في شكل مغزل من الأنيبيبات الدقيقة قبل أن تتراجع صوب الطرفين المتضادين للخلية، وكأنها تحيي بعضها في كياسة. تتوالى قائمة السلوكيات المدهشة لحقيقيات النوى، وأود أن أذكر مجرد واحدة أخرى وهي البلعمة، أو قدرة الخلية البلعمية على ابتلاع خلايا أخرى بكاملها وهضمها في داخلها. وهذه السمة يبدو أنها عتيقة حتى وإن كان ثمة مجموعات قليلة من الكائنات، مثل الفطريات والنباتات، قد فقدتها مجددًا. ومن ثم على سبيل المثال، مع أن أغلب الخلايا الحيوانية والنباتية لا تحتشد من أجل ابتلاع خلايا أخرى، فإن الخلايا المناعية تفعل هذا تمامًا حينما تلتهم البكتيريا، فهي تسلك في هذا سلوك الأميبا.

كل هذا يتعلق بجميع الخلايا حقيقية النوى، سواء أكانت نباتية أم حيوانية أم أميبية. هناك بالطبع فروق كثيرة بينها أيضًا، ولكن إذا وضعنا تلك الفروق أمام الخصائص المشتركة بينها فإنها تكون غير ذات بال. كثير من الخلايا النباتية تحتوي على حبيبات الكلوروفيل على سبيل المثال، وهي عضيات مسئولة عن عملية البناء الضوئي. وتلك الحبيبات، شأنها في هذا شأن الميتوكوندريا، كانت في قديم الزمان بكتيريا حرة المعيشة (في هذه الحالة من البكتيريا الزرقاء)، ثم ابتلعها بكاملها سلف مشترك لجميع النباتات والطحالب. وأيًّا كان السبب، فإن تلك الخلية السلف أخفقت في هضم وجبتها

الشهية، ومن خلال حالة من عسر الهضم اكتسبت تلك الخلايا كل ما يلزمها للاكتفاء الذاتي والاعتماد على النفس؛ إذ تحصل على طاقتها من الشمس والماء وثاني أكسيد الكربون فقط. وهكذا، في بلعة واحدة تحرك قطار الظروف الحياتية التي فصلت في نهاية الأمر بين عالم النباتات الساكن وعالم الحيوانات المفعم بالحركة. إلا أن وجود حبيبات الكلوروفيل تلك ما هو إلا فارق واحد مقابل ألف صفة مشتركة. ويمكننا أن نستمر في هذا؛ فالنباتات والفطريات تكوَّنَتْ لديها جدر خلوية خارجية لتدعم بنية أجسامها، وبعضها لديه فجوات خلوية، وهكذا. ولكن كل ذلك ليس أكثر من فروق طفيفة؛ إذ لا تُوجَد أي فروق تضاهي تلك الهوة الساحقة التي تفصل الخلايا حقيقية النوى عن البكتيريا.

إلا أنها هوة تثير الحيرة؛ فهي حقيقية وخيالية في آنٍ واحد. فيُوجَد شيء من التراكب أو التداخل بين البكتيريا والخلايا حقيقية النوى في جميع الصفات — تقريبًا — التي تأمَّلْناها. فثمة عدد قليل من البكتيريا كبيرة الحجم، كما يُوجَد كثير من الخلايا حقيقية النوى صغيرة الحجم، وهناك تراكب في المدى الحجمي بينهما. كما أن للبكتيريا هيكلًا خلويًّا داخليًّا؛ يُبطِّن جدارها الخلوي ويتكوَّن من ألياف تشبه كثيرًا الهيكل الخلوي حقيقي النواة، بل إنه يبدو ديناميكيًّا إلى حدٍّ ما. وهناك بكتيريا لديها كروموسومات مستقيمة (وليست دائرية)، ولها تراكيب تحاكي النواة وبها أغشية داخلية. قليل من البكتيريا يفتقر للجدر الخلوية، في جزء من دورة حياتها على الأقل. وبعضها يعيش في مستعمرات ذات طبيعة مُعقَّدة، وربما يمكن اعتبارها بمنزلة كائنات متعدِّدة الخلايا، وهذا بالطبع في رأي المدافعين عن البكتيريا. بل إن هناك حالة أو حالتين من البكتيريا التي تحمل بكتيريا أخرى أصغر حجمًا في داخلها، وهو اكتشاف غامض، خاصة في ضوء أنه لا يُوجَد نوع واحد من البكتيريا تُعرَف عنه القدرة على ابتلاع الخلايا بخاصية البلعمة. ورأيي أن البكتيريا بدأت طريقها محتوية على كل الصفات حقيقية النواة الممكنة تقريبًا، ثم توقَّفَتْ متخلفة عن الرَّكْب، غير قادرة على الاستمرار في تلك التجربة الحياتية، لأي سبب من الأسباب.

قد تشعر — معذورًا في ذلك — بأن هذا التراكب الذي ذكرناه ما هو إلا تدرج متصل للسمات؛ ومن ثَمَّ فلا شيء يحتاج إلى تفسير. وكان من الممكن ألا يُوجَد بون شاسع بين البكتيريا وحقيقيات النوى إذا كان ثمة طيف متصل بدءًا من البكتيريا البسيطة عند إحدى النهايتين وحتى حقيقيات النوى المعقدة عند النهاية الأخرى من ذلك الطيف.

وهذا صحيح بشكلٍ ما، ولكني أعتقد أنه مضلل؛ فبالرغم من وجود درجة ما من التراكب حقًّا، فإنه تراكب من طيفين مختلفين بالفعل. أحدهما طيف مبتور خاص بالبكتيريا، يتراوح بين «البساطة المتناهية» و«التعقيد المحدود»، والآخر أطول كثيرًا يخص حقيقيات النوى، ويتراوح بين «التعقيد المحدود» و«التعقيد الشديد والمحير للعقل». نعم؛ هناك تراكب ولكن البكتيريا لم ترتقِ كثيرًا على طيف حقيقيات النوى، وحدها حقيقيات النوى هي التي فعلَتْ ذلك.

ويظهر الفارق جليًّا في التاريخ بقوة؛ فعلى مدى ثلاثة الآلاف مليون سنة الأولى تقريبًا من الحياة على الأرض (منذ أربعة آلاف مليون إلى ألف مليون سنة مضَتْ)، سادت البكتيريا تلك الحياةَ. لقد غيَّرَتْ وجه العالم تمامًا، ولكنها بالكاد غيَّرَتْ نفسها؛ فالتغيُّرات البيئية التي سبَّبَتْها البكتيريا كانت هائلة، لدرجة يصعب علينا نحن البشر أن نتخيَّلها. فكل الأكسجين الذي بالهواء، على سبيل المثال، مشتقٌّ من عملية البناء الضوئي، التي كانت ممارستها — في الفترة المبكرة — ملقاة على عاتق البكتيريا الزرقاء وحدها. كما أن «واقعة الأكسدة العظيمة» حين تشبع الهواء وكذلك أسطح المحيطات المشمسة بكميات هائلة من الأكسجين، وذلك منذ حوالي ٢٢٠٠ مليون سنة، أدَّتْ إلى تغيير كبير في كوكبنا إلى الأبد، ولكن هذا التغيير لم يترك بصماته على البكتيريا ذاتها، بل كان هناك مجرد تحوُّل في النظام البيئي تجاه نوع البكتيريا التي تحب الأكسجين؛ فحدَثَ تفضيل لنوع واحد من البكتيريا على الآخر، ولكن بقيت أفراد النوع كلها بكتيرية بشكل واضح ومؤكد. ونفس الشيء ينطبق على سائر التحولات البارزة في الظروف والأحوال. كانت البكتيريا مسئولة عن خنق أعماق المحيطات بكبريتيد الهيدروجين، فترة وصلت إلى ٢٠٠٠ مليون سنة، ولكنها بقيت دائمًا كما هي؛ بكتيريا. وكانت البكتيريا مسئولة عن أكسدة غاز الميثان الجوي؛ مما أدَّى إلى حدوث ظاهرة تجمد أرضي شامل، وكان هذا أول حَدَث من نوعه في تاريخ الأرض، ولكنها بقيت كما هي؛ بكتيريا. ولعل أهم تغيير من نوعه بالنسبة للبكتيريا قد حَدَث بسبب نشوء حقيقيات النوى عديدة الخلايا المعقدة خلال الـ ٦٠٠ مليون سنة الماضية. فقد قدَّمَتْ حقيقيات النوى طرقًا جديدة للحياة للبكتيريا، مثل تسبب البكتيريا في الأمراض المعدية، ولكن بقيت البكتيريا كما هي؛ بكتيريا. فلا شيء من الكائنات أكثر مقاومة للتغيير من البكتيريا.

وهكذا بدأ التاريخ بحقيقيات النوى؛ فلأول مرة صار من الممكن أن نجد «شيئًا مختلفًا عما سبقه» بدلًا من التكرار النمطي الممل لنفس النمط على مَرِّ الزمان. وفي

أحيان قليلة، حدثت بعض الأشياء بسرعة. الانفجار الكمبري، على سبيل المثال، كان بالأساس انتشارًا سريعًا لطرز بدائية من الخلايا حقيقية النوى. كان ذلك الانفجار لحظة جيولوجية من عمر الزمان؛ إذ استمر مليونَيْ عام فقط. ظهرت حيوانات كبيرة فجأة، وتركت آثارها في سجل الحفريات لأول مرة. لم تكن تلك الأنواع مختلفة اختلافات ظاهرية وحسب، وإنما كانت حيوانات عجيبة الأشكال، رائعة الأجسام، اختفى بعضها مجددًا سريعًا كما ظهر سريعًا. فكأن تلك الحيوانات كانت نائمة خامدة في سِجِلِّ القَدَر ثم استيقظت فجأة لتعوض دهورًا سابقة خالية.

ثمة مصطلح تقني لهذا الانفجار هو «الإشعاع»، الذي يظهر فيه نوع من الأنواع فجأة، لسبب من الأسباب، ويستمر مطلق العنان فترة قصيرة من التطور. وهكذا نشأت أنواع جديدة إبداعية من أسلافها القديمة كأشعة ضوء خرجت من مصباح. صحيح أن الانفجار الكمبري هو الأكثر شهرة في هذا الصدد، إلا أن هناك أمثلة أخرى كثيرة؛ مثل: استعمار الأرض بالكائنات، ونشوء النباتات الزهرية، وانتشار الحشائش، ونشوء الثدييات وتباين أنواعها. وهذا قليل من كثير. وتلك الأحداث تَمِيل للحدوث حينما يكون التطور الجيني في مواجهة حدث بيئي غير مبرر، كأن تسود حالة انقراض جماعي. ولكن أيًّا كان السبب، فإن تلك الإشعاعات الهائلة يميزها أنها حقيقية النوى. ففي كل مرة لم تزدهر إلا حقيقيات النوى؛ أما البكتيريا فبقيت كما هي. ولا يسع المرء منا إلا أن يستنتج أن الذكاء البشري والوعي، وسائر الخصائص التي نعتز بها ونبحث عنها في أنحاء الكون، لم تكن لتنشأ في البكتيريا — التي تعيش على كوكبنا الأرضي على الأقل — بل إنها صفات حقيقية النواة محضة.

هذه التفرقة تثير الأسى؛ ففي حين أن البكتيريا تجعلنا نعجب بها ونغبطها لما فيها من صفات كيميائية حيوية عملاقة، فإنها تتصف بالتقزم الشديد فيما يختص بإمكاناتها المورفولوجية. ويبدو أنها عجزت عن التطور لتصل إلى مستوى الكائنات الراقية، نباتية كانت أم حيوانية، كالتي نراها حولنا ونُعجَب بها. ولعل هذا يجعل الانتقال من البكتيريا البسيطة إلى حقيقيات النوى المعقدة أهم عملية انتقالية في تاريخ كوكبنا.

يتصف أنصار المذهب الدارويني بأنهم لا يحبون الفجوات كثيرًا. وإن فكرة الانتقاء الطبيعي باعتباره سلسلة تدريجية من خطوات صغيرة، تمثل فيها كل خطوة تحسنًا

وتميزًا فوق الخطوة التي قبلها، تملي علينا أن نرى كائنات بينية — أي حلقات من تلك السلسلة — أكثر مما نراه بالفعل. ولقد ناقش داروين نفسه هذه القضية في كتابه «أصل الأنواع»، وأورد ملاحظة بسيطة تقول إن كل الخطوات الفاصلة تكون تحديدًا أقل قدرة على التأقلم من «النقاط النهائية» التي نراها حولنا اليوم. وبمقتضى طبيعة الانتقاء فإن الأنواع الأسوأ تختفي من الساحة وتنقرض لتفسح المجال لمنافسيها الأفضل. من الواضح أن الطيور التي تستطيع الطيران بمهارة تكون أفضل من أقربائها الذين أُجبِروا على الزحف على الأرض بدلًا من الطيران بالأجنحة. وبنفس الطريقة نعرف أن إصدارات برمجيات الكمبيوتر الجديدة تحل محل الإصدارات القديمة منها من السوق، فهل تجد الآن نظام التشغيل ويندوز ٢٨٦ أو ٣٨٦ في محلات لوازم الكمبيوتر؟ من المؤكد أنها اختفت، مع أنها كانت في السابق تجد إقبالًا كثيرًا، وكذلك النماذج الأصلية لأجنحة الطيور كانت شائعة منذ ملايين السنين ثم اندثرت (وإن كنا نجد بعض الحيوانات التي تعيش اليوم لديها القدرة على ما يشبه الطيران الشراعي مثل السناجب الطائرة والثعابين المنزلقة). وكما نعلم، فقد اختفت أنظمة تشغيل الكمبيوتر القديمة دون أثر تاركة فجوة ظاهرية قبل أن تظهر أنظمة مثل ويندوز إكس بي.[١] إننا نُسلِّم بأن أنظمة تشغيل ويندوز قد تحسَّنَتْ بمرور الزمن، ولكن إذا بحثنا عن أدلة على هذا التطور بمجرد مقارنة أجهزة الكمبيوتر المستخدمة اليوم؛ فلن نجد الكثير منها إلا إذا عثرنا على القليل المهمل من تلك الأجهزة مما يعلوه التراب في المخازن. نفس الشيء ينطبق على الكائنات الحية، فإذا أردنا أن نجد أدلة على وجود طيف من تلك الكائنات، فعلينا أن نطالع سجل الحفريات وأن نراجع الفترة التي حدثت فيها التغيرات.

لا شك أن سجل الحفريات يبدو منقطع التسلسل، ولكن تُوجَد في الحقيقة أنواع بينية أكثر بكثير مما تريد أن تعترف به قلة صاخبة من المتشددين. وحينما كان داروين يؤلف كتابه، كانت تُوجَد بالفعل «حلقة مفقودة» بين القردة العليا والبشر؛ إذ لم يجد أحد وقتها أي حفريات لأشباه البشر الذين لديهم صفات بينية. ولكن على مدى نصف القرن الأخير اكتشف علماء الحفريات نماذج منها، وكانت بصفة عامة تتوافق تمامًا مع ما قد يتوقعه المرء فيما يختص بالصفات الشخصية مثل حجم المخ وطريقة المشي. وبغضِّ النظر عما كان يبدو من قبل من غياب للأنواع البينية، فإننا الآن في مواجهة حالة من الإحراج سببها كثرة هذه الأنواع. وتكمن الصعوبة في أنه من الصعب أن نعرف أي تلك الأشكال شبه البشرية هم أسلاف البشر الحاليين، وأيها اختفى دون سبب واضح.

ولأننا لا نعرف جميع الإجابات (حتى الآن) فما زلنا نسمع ادعاءات عالية الصوت بأن الحلقة المفقودة تلك لم تُوجَد قط، وهذا افتراء على مبدأي النزاهة والحقيقة.

ولكن من وجهة نظري، بوصفي اختصاصيًّا في الكيمياء الحيوية، ما الحفريات إلا تسلية جميلة مشتتة. ففي ضوء عدم احتمالية العثور على حفريات وعدم القدرة على التنبؤ بأماكن وجودها — فضلًا عما تتسم به عملية البحث عن الحفريات من انحياز ضد الكائنات ذات الأجسام اللينة؛ مثل قنديل البحر، وضد النباتات والحيوانات التي تعيش على تربة جافة — فإن الحفريات يجب ألا تُعتَبَر سجلات غير قابلة للمناقشة عن الماضي. فإذا حدث هذا فيجب أن نشتبه في وجود غش وخداع. وإذا حدث أن أمدَّتْنا الحفريات بسجل للماضي بين الحين والآخر، فيجب أن نعتبر هذا من قبيل الحظ السعيد نتيجة لتحالف نادر من الظروف التي أتاحت لنا التوصُّل إليها، وأنها ليست أكثر من تأكيد للدليل الحقيقي على حقيقة الانتقاء الطبيعي. ذلك الدليل الحقيقي نجده حولنا دائمًا — في عصر علوم الجينوم — في تسلسلات الجينات الوراثية.

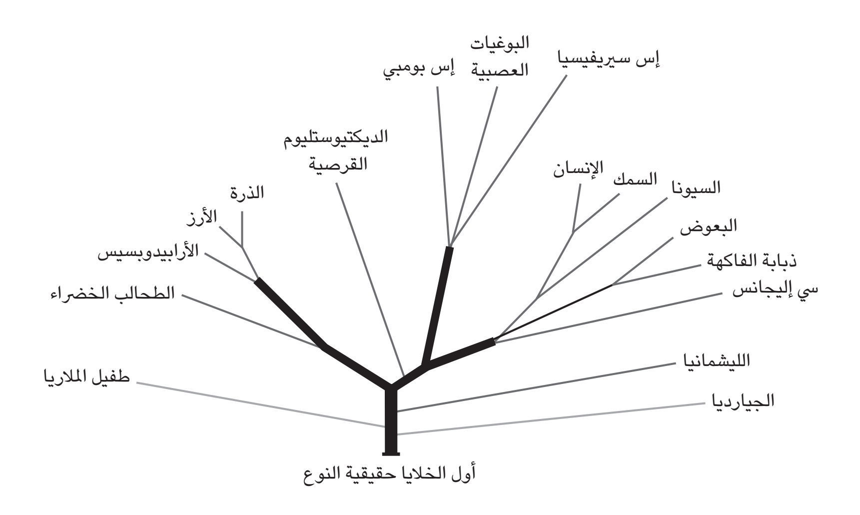
إن تلك التسلسلات الجينية تحفظ في داخلها شيئًا أقرب إلى جوهر النشوء والتطور من أي حفريات. خُذْ أيَّ جين تريده، وستجد تسلسله نظمًا طويلًا للحروف، وهذا النظم يتضمَّن شفرة من تتابع الأحماض الأمينية في البروتين. يُوجَد في المعتاد نحو مائتي حمض أميني في أي بروتين، وكلٌّ منها يشفِّره ثلاثة من أحرف الدي إن إيه (انظر الفصل الثاني). وكما لاحظنا بالفعل فإن جينات حقيقيات النوى غالبًا ما تشمل فواصل طويلة من الدي إن إيه غير المشفِّر، تكون منثورة بين امتدادات مشفِّرة أقصر طولًا. بجمع كل ذلك معًا، فإن تسلسل أحد الجينات يصل طوله إلى آلاف من الحروف. ثم إن هناك عشرات الآلاف من الجينات، وكلٌّ منها ينتظم بطريقة مماثلة. وإجمالًا، يتألَّف الجينوم من شريط من مليارات الحروف، وتكشف طريقة انتظام هذه الحروف الكثير عن الميراث التطوري للكائن الحي الذي يحتويه.

إن الجينات التي تُشفِّر البروتينات المسئولة عن أداء نفس المهام في أنواع متباينة من الكائنات متماثلة، بدءًا من البكتيريا وحتى البشر. وعلى مدى الزمن التطوري، حدثت طفرات ضارة في التسلسلات الجينية، وتمَّ التخلص منها بالانتقاء الطبيعي، وكانت نتيجة ذلك أن تَمَّ الاحتفاظ بنفس الحروف في مواضع متكافئة في التسلسل الجيني. ومن وجهة نظر عملية بحتة، فإن هذا يعني بدوره أنه يمكننا التعرُّف على الجينات ذات الصلة في الأنواع المختلفة بالرغم من مرور دهور لا تُحصى. لكن كقاعدة عامة،

نسبة ضئيلة فقط من آلاف الحروف الموجودة في أي جين هي التي تُعتَبر فعليًّا ذات أهمية، أما بقيتها فيمكن أيضًا أن تتفاوت بحرية مع تراكم الطفرات بمرور الزمن؛ ذلك لأن التغيُّرات في هذه الحالة ليست ذات أهمية كبيرة؛ ومن ثم لا يتم التخلص منها بالانتقاء الطبيعي. وكلما مَرَّ المزيد من الوقت زاد تراكم تلك الطفرات، وكذلك يصير التسلسلان الجينيان أكثر تمايزًا. وهكذا يكون لدى الأنواع التي تشترك معًا في سلف مشترك حديث نسبيًّا، مثل الشمبانزي والبشر، تسلسلات جينية عدة مشتركة، بينما التي تشترك في سلف مشترك آخر أكثر بعدًا، مثل النرجس البري والبشر، تحتفظ بقَدْر أقل منها. وتنطبق نفس القاعدة إلى درجة كبيرة على اللغات، التي تتباعد بمرور الزمن بين الجماعات، فتفقد باطراد أي تشابه لها مع السلف المشترك فيما عدا بعض نقاط من التشابه الخفي التي ما زالت تجمعها.

تُبنى الأشجار الجينية على أساس الاختلافات في التسلسل الجيني بين الأنواع. وبالرغم من وجود درجة من العشوائية فيما يتعلق بتراكم الطفرات، فإن تأثيراتها تتوازن حين تُقسَّم على مدى آلاف من الحروف؛ مما يعطي احتمالية إحصائية لوجود نِسَب وقرابة. وباستخدام جين واحد يمكننا أن نعيد إنشاء شجرة العائلة لجميع حقيقيات النوى بدرجة من الدقة تتجاوز أعمق أحلام صائدي الحفريات. فإذا كان في صدرك أي شكوك، فما عليك سوى أن تكرر التحليل مستخدمًا جينًا مختلفًا، وانظر ما إذا كنت ستحصل على نفس النمط. ونظرًا لأن حقيقيات النوى لديها مئات، إن لم يكن آلاف، من الجينات المشتركة، فإنه يمكن تكرار هذا الأسلوب مرارًا، وتتراكب الأشجار فوق بعضها البعض. وبقليل من أدوات الكمبيوتر يمكن بناء شجرة «توافقية»؛ مما يعطي أكثر العلاقات احتمالية بين جميع حقيقيات النوى. وهذا الأسلوب يُجنِّبنا الفجوات الموجودة في سجل الحفريات؛ إذ يمكننا أن نرى بالضبط ماهية علاقاتنا بالنباتات والفطريات والطحالب … إلخ (انظر الشكل ٤-٢). لم يكن داروين يعرف شيئًا عن الجينات، ولكن البنية الدقيقة للجينات، أكثر من أي شيء آخر، هي التي تخلصت من كل الفجوات البغيضة في النظرة الداروينية للعالم.

كل هذا جيِّد إلى الآن، ولكن هناك بعض المشكلات أيضًا، وهي في أغلبها نتيجة لأخطاء إحصائية في قياس التغيُّر الحادث على مدى زمن بالغ القِدَم. والمشكلة الأساسية هي أنه تُوجَد أربعة حروف مختلفة فقط في الدي إن إيه، وعادة ما تُبدَّل الطفرات الجينية (على الأقل بالنسبة للنمط الذي نحن بصدده هنا) حرفًا بآخر. فإذا تم استبدال



شكل ٤-٢: شجرة الحياة التقليدية، وتُظْهِر تشعُّبَ حقيقيات النوى من سلف مشترك؛ وهو كائن وحيد الخلية، كان يعيش منذ نحو ملياري عام مضت. وكلما كان الفرع أطول، كانت المسافة التطورية أكبر؛ أي كانت الجينات أكثر اختلافًا.

معظم الحروف مرة واحدة فقط؛ فلا بأس، ولكن على مدى المسافات الشاسعة من الزمن التطوري، لا بد أن يحدث استبدال لأكثر من مرة. ونظرًا لأن كل تغيُّر ينطوي على الحظ، فمن الصعب أن نعرف ما إذا كان كل حرف قد تمَّ استبداله مرة أم خمسًا أم عشر مرات. وإذا لم يكن قد حَدَث تغيُّر لأحد الحروف مطلقًا، فربما لم يكن قد تم استبداله مطلقًا، أو ربما تم استبداله مرات عدة، مع وجود فرصة في كل مرة بنسبة ٢٥ بالمائة أن يتم استعادة الحرف الأصلي. ونظرًا لأن تلك التحليلات هي مسألة احتمالية إحصائية، فإن من المتوقع أن تأتي مرحلة لا نستطيع وقتها أن نُميِّز بين الاحتمالات المختلفة. وقد يسوء الحظ، فيتصادف أن يكون الوقت الذي نتخبَّط فيه في بحر من الشك الإحصائي متوافقًا — تقريبًا — مع انبثاق الخلية حقيقية النواة نفسها. والانتقال الحاسم والمهم من طَوْر البكتيريا إلى حقيقيات النوى غارق في بحر من الشك وعدم اليقين من الناحية الجينية. والطريقة الوحيدة للخروج من هذه المشكلة هي أن نستخدم «غربالًا» إحصائيًّا ذا فتحات أدقَّ؛ لتُنتقى جيناتنا بحرص وعناية أكبر.

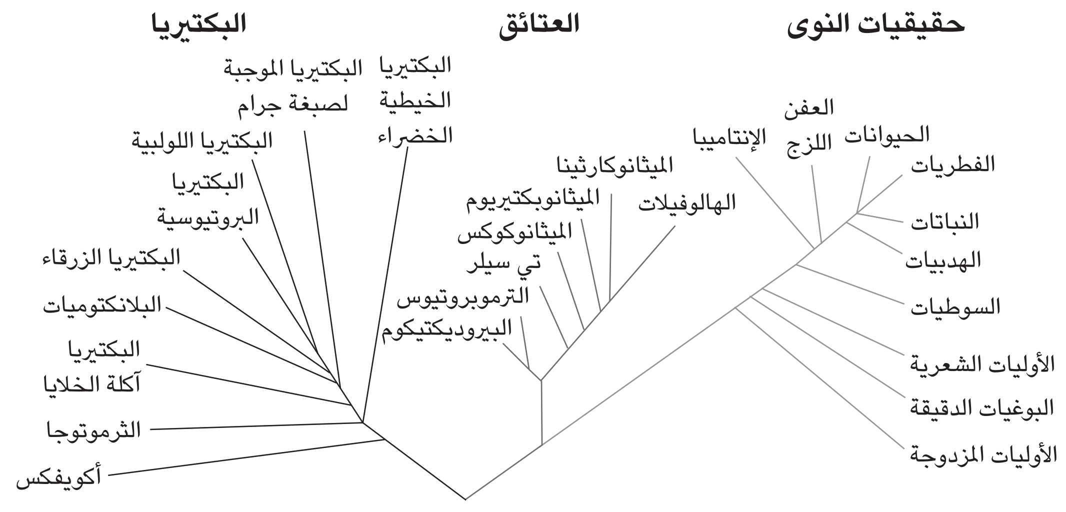
تُوجَد في الخلايا حقيقية النوى فئتان عريضتان من الجينات: الجينات التي لها مكافئات في البكتيريا والجينات التي يبدو أنها تقتصر في وجودها على حقيقيات النوى بشكل فريد، ولم يُكتشَف مثلها حتى الآن في عالم البكتيريا.[٢] هذه الجينات الفريدة تُعرَف باسم «الجينات التوقيعية لحقيقيات النوى»، وميراثها هو مصدر نزاع مرير؛ إذ يقول البعض إنها تثبت أن نطاق حقيقيات النوى له وزنه واحترامه كما أن للبكتيريا وزنها واحترامها. وحقيقة أن هناك جينات حقيقية النوى كثيرة مميزة، على حد قولهم، تعني بالتأكيد أن حقيقيات النوى كانت تباعد نفسها عن البكتيريا منذ بداياتها. وإذا افترضنا أن سرعة تباعدها هذه ثابتة (إذ يعمل معدل التحوُّل كساعة جزيئية) فإن مقياس الاختلافات من شأنه أن يجعلنا نعتقد أن حقيقيات النوى قد نشأت منذ أكثر من ٥ مليارات سنة، أي قبل أن تتكوَّن الأرض نفسها بنصف مليار سنة على الأقل. وهذا خطأ فادح لا يُصدِّقه عقل سليم ولا غير سليم، على حد ما قد تقوله المجلة الإنجليزية الساخرة «برايفت آي» إذا سمعت بهذا القول.

يقول البعض الآخر إن الجينات التوقيعية لحقيقيات النوى لا تخبرنا بشيء عن الميراث التطوري لحقيقيات النوى؛ إذ ليست لدينا طريقة نعرف بها السرعة التي يمكن أن تكون الجينات قد تطورت بها في الماضي البعيد، ولا سبب يدعونا لافتراض أنَّ تباعُدها كان له معدل منتظم كالساعة. نحن نعرف بالتأكيد أن بعض الجينات تتطوَّر بسرعة أكبر من جينات أخرى اليوم. كما أن الحقيقة القائلة إن الساعات الجزيئية تشير إلى ذلك الماضي العتيق المشكوك فيه توحي بأنه إما أن الحياة قد تَمَّ بَذْرها من الفضاء — وهو تفسير لا يَفِي بالمطلوب في رأيي — وإما أن تلك الساعات خطأ. فلماذا تكون خطأ؟ لأن السرعة التي تتطوَّر بها الجينات تعتمد كثيرًا على ظروف الحياة وأحوالها، ولا سيما نوع الكائن الذي تجد نفسها فيه. وكما قلنا منذ قليل، فإن البكتيريا كائنات متحفظة تقاوم التغيير، فبقيت كما هي على مَرِّ الزمان بينما تبدو حقيقيات النوى أكثر استجابة لنوبات من التغيير الكبير، كما حدث فيما سُمِّي بالانفجار الكمبري الذي ذكرناه سابقًا. ويمكن القول إنه لا تُوجَد نوبة من التغيير أقوى وأشد تأثيرًا، من وجهة النظر الجينية، من تكوُّن الخلية حقيقية النواة ذاتها، وإذا كان الأمر كذلك، فلا بد أن نتوقَّع أنه قد حَدَث معدل هائل من التغيير في تلك الأيام المبكرة التي تشكَّلَتْ فيها حقيقيات النوى. فإذا كانت حقيقيات النوى قد نشأت في وقت أحدث من البكتيريا، كما يعتقد أغلبُ الباحثين، فإن جيناتها لا بد أن تكون مختلفة جدًّا؛ لأنها في وقتٍ ما، أو على مدى فترة ما، تطوَّرَتْ بسرعة كبيرة، وتحوَّلَتْ وتكاثرت وتضاعفت، ثم تحوَّلَتْ مجددًا.

وهكذا، فإن الجينات التوقيعية لحقيقيات النوى ليس لديها سوى القليل لتخبرنا به عن تطوُّر حقيقيات النوى. ببساطة هي تطوَّرَتْ بسرعة وبقدرٍ كبير لدرجة أن أصولها فُقِدَتْ في غياهب الزمن. ماذا عن المجموعة الثانية من الجينات؛ تلك التي لديها مكافئات معروفة في البكتيريا؟ هذه الجينات مفيدة أكثر من الناحية التعريفية؛ إذ يمكننا عن طريقها أن نبدأ في المقارنة بين المتشابهات منها. فالجينات التي تُوجَد في كلٍّ من البكتيريا وحقيقيات النوى غالبًا ما تشفر عمليات أساسية في الخلية، سواء أكانت من الأيض الأساسي (والأيض هو الطريقة التي يتم بمقتضاها توليد الطاقة ويُستخدَم في بناء اللبنات المهمة للحياة؛ مثل: الأحماض الأمينية والدهون)، أو العمليات التعريفية الأساسية (أي الطريقة التي تتم بمقتضاها قراءة الدي إن إيه وترجمته إلى عملة نشطة من البروتينات). وتلك العمليات الأساسية عادة ما تتطوَّر ببطء؛ نظرًا لوجود الكثير غيرها مما يعتمد عليها. فإذا استطعنا تغيير وجه واحد من وجوه تركيب البروتينات، فسوف تتغير عمليات تصنيع جميع البروتينات وليس بروتينًا واحدًا فقط. وبالمثل، فإن تغيير عملية توليد الطاقة، ولو بقدر طفيف، يُعرِّض نظام الخلية ككلٍّ للخطر. ونظرًا لأن التغيُّرات في الجينات الأساسية تكون أكثر قابلية لأن ترصدها عملية الانتقاء الطبيعي وتزيلها، فإن هذه الجينات تتطور ببطء، ومن ثم يجب أن تعطينا تحليلًا أدق للنشوء والتطور. وإذا بُنِيَتْ شجرة من تلك الجينات فيمكنها مبدئيًّا أن تُظْهِر العلاقة بين حقيقيات النوى والبكتيريا. ولعلها تشير إلى المجموعة التي نشأت منها الجينات، بل وربما أعطت تلميحًا عن سبب تلك النشأة.

كان عالم الأحياء الدقيقة الأمريكي كارل وويس أول مَنْ بَنَى شجرةً بهذا الشكل في أواخر سبعينيات القرن العشرين. وقد اختار أحد الجينات التي تشفر جزءًا من العمليات التعريفية بالخلية — وتحديدًا، جزءًا من تلك الآلات الجزيئية الدقيقة التي تُسمَّى الريبوسومات، التي تضطلع بعملية تخليق البروتينات. ولأسباب تقنية، لم يستخدم ووويس الجين نفسه أصلًا، وإنما استخدم نسخة تتكوَّن من الآر إن إيه، وتلك تُقرَأ من الجين، ثم تُدخَل مباشرة إلى الريبوسوم. وقد عزل ووويس ذلك الآر إن إيه الريبوسومي من أنواع مختلفة من البكتيريا وحقيقيات النوى، وحدَّد تتابعاتها ورسم شجرة بمقارنة التتابعات. وكانت النتائج صدمة؛ إذ تحدَّتْ أفكارًا طالما تمسَّك بها العلماء قبل ذلك عن الكيفية التي ينبغي أن يكون العالم الحي قد تشكَّل بها.

وجد ووويس أن كل صنوف الحياة على كوكبنا تندرج ضمن ثلاث مجموعات أو نطاقات (انظر الشكل ٤-٣): المجموعة الأولى هي البكتيريا، كما هو متوقع،



شكل ٤-٣: شجرة الحياة على أساس الآر إن إيه الريبوسومي، وتظهر منظومة كارل وويس التي تقسم الكائنات الحية إلى ثلاث مجموعات كبيرة للحياة؛ وهي: البكتيريا، والعتائق، وحقيقيات النوى.

والمجموعة الثانية هي حقيقيات النوى. ولكن هناك مجموعة ثالثة، تُعرَف الآن بالعتائق، كأنها جاءت من المجهول لتتخذ موقعًا بارزًا على مسرح الحياة في العالم. ومع أن عدد أنواع العتائق التي عُرِفَتْ على مدى قرن تقريبًا كان قليلًا للغاية يمكن عدُّه على الأصابع؛ فقَبْل ظهور شجرة وويس الجديدة كان ينظر إليها كقطاع صغير داخل مجموعة البكتيريا. ولكن بعد أن جاء وويس صارت لها أهمية تُماثِل أهمية حقيقيات النوى، بالرغم من حقيقة أنها «تبدو ظاهريًّا» مثل البكتيريا؛ فهي دقيقة الحجم، وعادة ما يكون لها جدار خلوي خارجي، وليست بها نواة أو أي شيء إضافي في داخلها يستحق التعليق، ولا تتكوَّن منها مستعمرات قد تجعل المرء يخطئ فيعتبرها من الكائنات متعددة الخلايا. وقد صدمَتِ المغالاةُ في إضفاء الأهمية عليها الكثيرين، واعتبروا هذا محاولة لإعادة تركيب العالم بأسلوب وقح، يجري فيه استبعاد ذلك التنوُّع المتشعِّب الرائع للنباتات والحيوانات والفطريات والطحالب والكائنات الأولية إلى ركن غير مهم من شجرة تسودها الخلايا حقيقية النوى. إن وويس يريدنا أن نعتقد أن كل الاختلافات المتنوعة بين النباتات والحيوانات هي لا شيء إذا قُورِنَتْ بالهوة غير المرئية بين البكتيريا والعتائق. شعر عدد من علماء الأحياء المشهورين مثل إرنست ماير ولين مارجوليس بالغضب الشديد. وبعد ذلك بسنوات وإيماءً إلى تلك المجادلات الحادة أوردت مجلة «ساينس» العلمية هذه القضية واصفةً وويس بأنه «عالم الأحياء الدقيقة الثوري الجريح».

وبعد كل ما نشب من معارك، صار أغلب الباحثين اليوم متقبلين لشجرة وويس، أو على الأقل متقبلين للمكان البارز الذي تحتله العتائق. والحقيقة أن العتائق على المستوى الكيميائي الحيوي تختلف عن البكتيريا من جميع النواحي تقريبًا؛ إذ يتكوَّن الغشاء الخلوي فيها من دهون مختلفة، يتم تركيبها بمساعدة مجموعة مختلفة من الإنزيمات. ولا شيء مشترك بين جدرها الخلوية والجدر الخلوية البكتيرية، ويُوجَد تراكب طفيف بين مساراتها الأيضية ومسارات البكتيريا. وكما رأينا في الفصل الثاني، فإن الجينات التي تتحكَّم في تضاعف الدي إن إيه في الحالتين مختلفة تمامًا ولا علاقة بينهما. والآن وقد صارت تحاليل الجينومات الكاملة شيئًا مألوفًا، صرنا نعرف أن العتائق تشترك مع البكتيريا في أقل من ثلث جيناتها، والباقي يُعتبَر فريدًا ومميَّزًا. وبصفة عامة، فقد ساعدت شجرة الآر إن إيه — التي لم تكن في الحسبان — لوويس في التركيز على سلسلة من الاختلافات الكيميائية الحيوية الرئيسية بين البكتيريا والعتائق، وإن كانت طفيفة إلى درجة عدم ملاحظتها؛ مما يجعلها معًا تدعم ما أقدم عليه من جرأة في إعادة تصنيف الكائنات الحية.

كان الجانب الثاني غير المتوقع من شجرة وويس هو وجود علاقة وثيقة بين العتائق وحقيقيات النوى (انظر الشكل ٤-٣)؛ فكلاهما نشأ من سلف مشترك مختلف على نحوٍ كبير عن البكتيريا. وبتعبير آخر نقول إن السلف المشترك للعتائق وحقيقيات النوى قد تفرَّع بعيدًا عن البكتيريا في مرحلة مبكرة جدًّا من التطوُّر، ثم بعد ذلك انشقَّ إلى نصفين ليكوِّن العتائق الحديثة وكذلك حقيقيات النوى. ومرة أخرى، دعمت الكيمياء الحيوية شجرة وويس، في عدة نواحٍ مهمة على الأقل. تُوجَد أشياء كثيرة مشتركة بين العتائق وحقيقيات النوى فيما يتعلَّق بعملياتهما التعريفية الأساسية بصفة خاصة؛ فكلاهما يلف ويغلف ما به من الدي إن إيه ببروتينات (هستونات) متشابهة بشكل مميز، وكلاهما يتضاعف ويقرأ جيناته بطريقة مشابهة، وكلاهما يبني بروتيناته بآلية مشتركة، وكلاهما يختلف جملة وتفصيلًا عن البكتيريا. ومن هذه النواحي يمكن اعتبار العتائق بمنزلة حلقة مفقودة، تسد جزئيًّا الفجوة الكبيرة التي بين البكتيريا وحقيقيات النوى. وخلاصة القول، إن العتائق تضاهي البكتيريا في المظهر والسلوك، ولكنها تتميز بشكل مذهل ببعضٍ من صفات حقيقيات النوى في طريقة التعامل مع الدي إن إيه والبروتينات.

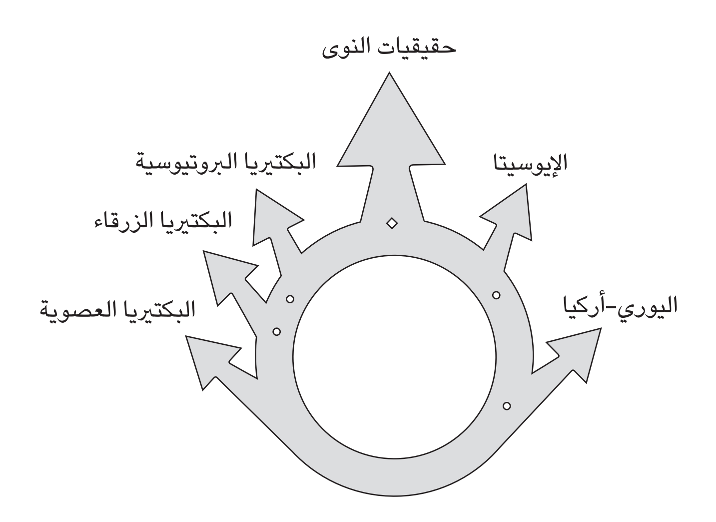
مشكلة شجرة وويس أنها بُنِيَتْ من جين واحد؛ ومن ثم تفتقد القوة الإحصائية التي تُكتسَب بمطابقة الأشجار الجينية بعضها ببعض. ويمكننا فقط أن نعتمد على شجرة جينية واحدة إذا أمكننا التأكد من أن الجين المختار يعكس الميراث الحقيقي للخلايا حقيقية النوى. وأفضل طريقة لاختبار ما إذا كان هذا هو الحال حقًّا ومعرفة ذلك؛ هي أن نطابق جينات أخرى بطيئة التطور لمعرفة ما إذا كانت هي أيضًا تكرِّر نفس ذلك النمط شديد التفرع. وحينما يتم هذا، تصير الإجابات مُحيِّرة. فإذا اخترنا الجينات المشتركة فقط بين كل المجموعات الثلاث من الكائنات الحية (أي التي تُوجَد في البكتيريا والعتائق وحقيقيات النوى) فيمكننا حينئذٍ أن نُعِيد إنشاء أشجار قوية للبكتيريا والعتائق ولكن ليس لحقيقيات النوى. فحقيقيات النوى خليط يثير الارتباك؛ فبعض جيناتها مشتق ظاهريًّا من العتائق والبعض الآخر من البكتيريا. وكلما زاد عدد الجينات التي ندرسها — وقد جمَّع أحد التحاليل الحديثة ٥٧٠٠ جين، أُخِذَتْ من ١٦٥ نوعًا مختلفًا في «شجرة فائقة» — زاد الاقتناع بالحقيقة القائلة إن الخلية حقيقية النواة لا تتطوَّر بطريقة «داروينية» قياسية، ولكن بنوعٍ ما من الالتحام الجيني الهائل. ومن وجهة النظر الجينية، كانت الخلية حقيقية النواة الأولى هجينًا؛ نصفه من العتائق والنصف الآخر من البكتيريا.

طبقًا لما قاله داروين، فإن الحياة تتطوَّر بتراكم بطيء للاختلافات بمرور الزمن، مع تشعُّب الذريات المختلفة بعيدًا عن سلفها المشترك. النتيجة هي شجرة متفرعة، ولا ريب أن تلك الأشجار هي خير وسيلة لاستيضاح تطوُّر أغلب الكائنات التي يمكن أن نراها، وهي — بالأساس — أغلب حقيقيات النوى الكبيرة. ولكن من الواضح بدرجة متساوية أن تلك الأشجار ليست أفضل وسيلة لإيضاح تطوُّر الميكروبات، سواء من البكتيريا أو العتائق أو حقيقيات النوى.

ثمة نوعان من العمليات يلحقان الارتباك بالأشجار الجينية الداروينية؛ وهما: عمليات النقل الجيني الجانبي، وعمليات الدمج الجينومي الكلي. وبالنسبة لعلماء النشوء والتطور الميكروبي الذين يحاولون إضفاء المنطق على العلاقات بين البكتيريا والعتائق، تُعتبَر عمليات النقل الجيني شائعة بشكل يُثِير الضيق. وهذا المصطلح الثقيل على اللسان شيئًا ما يعني ببساطة أن الجينات يتمُّ تمريرها هنا وهناك مثل النقود، من كائن حي إلى آخر. والنتيجة هي أن الجينوم الذي يُمرِّره أحد أنواع البكتيريا إلى نسله قد يكون أو لا يكون مماثلًا للجينوم الذي ورثه من أبيه. فبعض الجينات مثل الآر إن إيه الريبوسومي لوويس يميل لأن يمرر لأسفل «رأسيًّا» من أحد الأجيال إلى الذي يليه، بينما تحدث مقايضة لجينات أخرى هنا وهناك، وغالبًا ما يكون هذا من وإلى ميكروبات لا علاقة لها بها مطلقًا.[٣] وتكون الصورة الكلية شيئًا ما بين الشجرة والشبكة، مع وجود جينات أساسية (مثل الآر إن إيه الريبوسومي لوويس) تميل إلى تكوين شجرة، وأخرى تميل إلى صنع شبكة. ليس ثمة اتفاق حول ما إذا كانت تُوجَد مجموعة أساسية من الجينات لا يمكن أن تُنقَل بعملية نقل جيني جانبي أم أنه لا وجود لمثل تلك المجموعة. وإذا لم تكن تُوجَد، فإن مجرد فكرة تتبُّع التطور وصولًا إلى مجموعات معينة من حقيقيات النوى تصير أمرًا لا معنى له؛ فتلك «المجموعات» تكون لها هوية تاريخية فقط إذا كانت ترث صفات أغلبها من أسلافها، وليس من مجموعات عشوائية أخرى. وعلى العكس، فإذا كانت مجموعة صغيرة فقط من الجينات هي التي لا يتم تمريرها أبدًا بينما يحدث هذا لجميع الجينات الأخرى، فماذا يعني هذا بالنسبة للهوية؟ هل تظل بكتيريا إي كولاي مثلًا كما هي حتى إذا تمَّ استبدال ٩٩ بالمائة من جيناتها عشوائيًّا؟[٤]

وكذلك فإن عمليات الدمج الجينومي تُسبِّب صعوبات مماثلة. والمشكلة هنا هي أن الشجرة الداروينية تكون مقلوبة رأسًا على عقب؛ فبدلًا من أن تكون متشعِّبة تصير متجمعة. ومن ثمَّ يصير السؤال هو: أي الشريكين (أو الشركاء) يعكس المسار الحقيقي

للتطور؟ فإذا تتبَّعْنا فقط الجين الخاص بالآر إن إيه الريبوسومي، فسنحصل على شجرة داروينية متفرعة بشكل تقليدي، ولكن إذا وضعنا في اعتبارنا عددًا كبيرًا من الجينات، أو جينومات كلية كاملة، فستحصل على حلقة تصير فيها الفروع — التي كانت في السابق متشعبة — متجمعة ومندمجة معًا (انظر الشكل ٤-٤).



شكل ٤-٤: «حلقة الحياة»: السلف المشترك الأخير لجميع الكائنات الحية يُوجَد في الأسفل، ثم ينقسم إلى البكتيريا (إلى اليسار) والعتائق (إلى اليمين)، ثم يندمج أفراد من المجموعتين مجددًا وصولًا إلى حقيقيات النوى الهجينة في الأعلى.

لا شكَّ أن الخلية حقيقية النواة هجين جيني، ولا أحد ينكر هذا. ويقتصر التساؤل، الذي يسبب انقسامًا للعلماء الآن إلى معسكرات عدة، على مقدار التركيز الواجب منحه لنظرية التطور الداروينية القياسية وذلك الواجب منحه لنظرية الدمج الجيني الكلي. بعبارة أخرى، ما مقدار خصائص الخلية حقيقية النواة الناشئة بالتطور التدريجي لخلية عائل، ومقدار الخصائص التي يمكن أن تنشأ «فقط بعد» عملية دمج جيني؟ وعلى مدى عقود عدة صدرت أعداد لا حصر لها لنظريات عن أصل الخلية حقيقية النواة، وتتراوح من التخيُّل المحض، إن لم يكن الفبركة، وحتى النظريات الكيميائية الحيوية

جيدة الصياغة، ولكن لم يثبت أيٌّ منها. وتُصنَّف كل النظريات ضمن مجموعتين كبيرتين؛ وذلك بالتركيز إما على التشعب الدارويني البطيء وإما على الدمج الجيني الكلي. وهاتان المجموعتان ما هما إلا انعكاس لصراع أقدم، في مجال علم الأحياء، بين الذين يجادلون قائلين إن التطور يتقدَّم بالتغير المستمر التدريجي، والذين يُصِرُّون على وجود فترات هائلة من الركود أو التوازن تقطعها أحيانًا فترات قليلة من التغيُّر المفاجئ الجذري. وكما قال البعض متندِّرًا: إنه التطور بالزحف في مقابل التطوُّر بالقفزات.[٥]

وفيما يخص الخلية حقيقية النواة يُسمِّي العالم كريستيان دي دوف المجموعتين: «الخلية البلعمية البدائية»، و«المصادفة القَدَرية». فأما فكرة الخلية البلعمية البدائية فتندرج ضمن المفهوم الدارويني، وأكثر العلماء اقتناعًا بها وتأييدًا لها هما توم كافالير سميث ودي دوف نفسه. وتقول تلك الفكرة أساسًا إن سلف الخلية حقيقية النواة تراكمت فيه تدريجيًّا جميع خصائص الخلية حقيقية النواة الحديثة، بما فيها وجود النواة، والتكاثر الجيني، والهيكل الخلوي، وأهمها جميعًا؛ وهي خاصية البلعمة الخلوية — أو القدرة على ابتلاع خلايا أخرى. ويتم ذلك بأن تُغَيِّر شكلها ثم تبتلع الخلايا الأخرى وتهضمها في داخلها. والصفة الوحيدة التي تنقص هذه الخلية البلعمية البدائية، مقارنة بحقيقيات النوى الحديثة، هي الميتوكوندريا، التي تولِّد الطاقة باستخدام الأكسجين. ومن المفترض أن تلك الخلية البلعمية البدائية اعتمدت على عملية التخمُّر للحصول على الطاقة، وهي عملية أقل كفاءة بكثير.

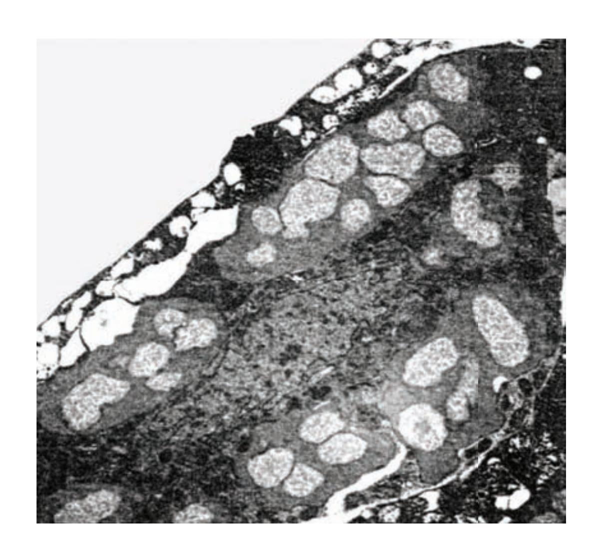
لكن بالنسبة للخلية البلعمية كان التهام أسلاف الميتوكوندريا مجرد جزء من نشاطها اليومي المفيد. فماذا يمكن أن يكون أسهل من ذلك؟ في الواقع، هل من طريقة أخرى كان يمكن بمقتضاها أن تدخل خلية في خلية أخرى؟ حقًّا؛ إن امتلاك الخلية البلعمية البدائية للميتوكوندريا أعطاها ميزة مهمة — فقد حققت لها ثورة في توليد الطاقة — ولكنها لم تُغَيِّر كيانها بشكل أساسي؛ فقد كانت خلية بلعمية قبل أن تبتلع الميتوكوندريا وبقيت خلية بلعمية بعدها، وإن صار لديها المزيد من الطاقة. ولكن ربما انتقل الكثير من الجينات من الميتوكوندريا الحبيسة إلى جينوم خلية العائل، وربما كان هذا الانتقال هو السبب في الطبيعة الهجينة للخلية حقيقية النواة الحديثة. والجينات المشتقة من الميتوكوندريا ذات ميراث بكتيري أصلًا. ومن ثم، فإن من يدافعون عن فكرة الخلية البلعمية البدائية لا يتشكَّكون في الطبيعة الهجينة لحقيقيات النوى الحديثة،

ولكنهم يفترضون نمطًا غير هجين للخلية البلعمية الأصلية، باعتبارها خلية العائل، وهو أمر منطقي إذا اعتبرناها خلية حقيقية النواة بدائية.

في بدايات عقد الثمانينيات من القرن الماضي، ألقى توم كافالير سميث الضوءَ على مجموعة مُكَوَّنة من ألف نوع أو أكثر من حقيقيات النوى وحيدة الخلية التي تبدو بدائية وتعوزها الميتوكوندريا. وقال كافالير سميث إن قليلًا منها ربما نجا وعاش منذ الأيام المبكرة من حياة الخلية حقيقية النواة، مع اعتبارها ذرية مباشرة للخلية البلعمية البدائية التي لم تكن تمتلك ميتوكوندريا مطلقًا. إذا كان الأمر كذلك، فمن المفترض ألا تظهر عليها أي علامات على التهجين الجيني، على أساس أنها نشأت وتطورت بعمليات تتفق تمامًا مع النظرية الداروينية. ولكن على مدى العقدين التاليين لمقولة ذلك العالم تبيَّنَ أنَّ جميع تلك الخلايا ظهرت عليها علامات التهجين الجيني؛ فجميعها على ما يبدو كانت لديها ميتوكوندريا في وقتٍ ما ثم فقدَتْها بعد ذلك، أو تعدَّلَتْ لديها إلى شيء آخر. والحقيقة إن «جميع» الخلايا حقيقية النوى المعروفة إما تمتلك ميتوكوندريا اليوم، وإما امتلكتها في الماضي. وإذا كانت تُوجَد خلايا بلعمية بدائية تعوزها الميتوكوندريا، فلا بد أنها لم تُخلِّف وراءها أي ذرية مباشرة. وذلك لا يعني أننا نقول إنها لم تُوجَد مطلقًا، ولكن نقول ببساطة إن كلامنا عن وجودها ضرب من الحدس.

أما المجموعة الثانية من النظريات فتندرج تحت راية «المصادفة القَدَرية». فجميعها تفترض أنه كان ثمة نوع ما من الارتباط بين اثنين من الخلايا بدائية النوى، وانتهى الأمر بتكوين مجموعة وثيقة الصلة والتشابك من الخلايا؛ أي هجين خلوي جيني. ولو لم تكن خلية العائل خلية بلعمية ولكن خلية من العتائق لها جدار خلوي، لبرز السؤال الأكبر وهو: كيف دخلت الخلايا الأخرى داخلها؟ ويشير المناصرون الرئيسيون لهذه الفكرة، لا سيما لين مارجوليس وبيل مارتن (اللذين صادفناهما بالفعل في الفصل الأول) إلى احتمالات مختلفة. فمثلًا يفترض مارجوليس وجود مفترس بكتيري شقَّ طريقه بالقوة داخل بكتيريا أخرى (وتُوجَد أمثلة لذلك). وأما مارتن فإنه، على العكس، يفترض وجود علاقة أيضية متبادلة بين الخلايا، التي يكشف عنها بالتفصيل، بينما يتبادل كل شريك المواد الخام مع الآخرين.[٦] وفي هذه الحالة، من الصعب أن ترى كيف يمكن أن تدخل خلية بدائية النواة ماديًّا داخل خلية أخرى دون استخدام خاصية البلعمة، ولكن مارتن يَعْرض مثالين لحدوث هذا بالضبط في البكتيريا (انظر الشكل ٤-٥).

وتُعتبَر نظريات «المصادفة القَدَرية» جميعها غير داروينية بالأساس، وذلك في كونها لا تفترض حدوث تغيرات صغيرة كأسلوب للتطور، ولكن تفترض نشأة مفاجئة



شكل ٤-٥: خلايا بكتيرية تعيش داخل خلايا بكتيرية أخرى. يظهر عدد من البكتيريا من نوع متقلبات جاما (بلون رمادي فاتح منقط) تعيش داخل بكتيريا من نوع متقلبات بيتا (بلون رمادي أدكن)، وجميعها داخل خلية حقيقية النواة، وتظهر نواتها المبرقشة عند أسفل مركز الصورة.

نسبيًّا لكيان جديد تمامًا. المهم أن هذا الافتراض يقول إن جميع الصفات الوراثية لحقيقيات النوى نشأت فقط «بعد» حدوث الاتحاد القدري. كانت الخلايا المتحدة نفسها من بدائيات النوى بالتحديد، وتعوزها خواص البلعمة الخلوية والتكاثر الجنسي ووجود هيكل خلوي فعال، ونواة، وهكذا. ولم تظهر صفاتها إلا بعد ثبات الاتحاد وتماسكه. يعني هذا أنه كان هناك شيء متعلِّق بالاتحاد نفسه حول الخلية بدائية النواة المتحفظة أساسًا، المقاومة للتغيير، إلى النقيض: خلية حقيقية النواة نشيطة دائمة التغير.

كيف يمكننا أن نُميِّز بين هذين الاحتمالين؟ رأينا بالفعل أن الجينات التوقيعية لحقيقيات النوى لا يمكنها أن تساعدنا. ولا وسيلة أمامنا لمعرفة ما إذا كانت قد نشأت وتطوَّرت على مدى ٤ مليارات سنة، أم مليارَيْ سنة، وما إذا كانت قد نشأت قبل حدوث الاندماج بالميتوكوندريا أم بعد ذلك. وحتى الجينات المتطورة ببطء التي لها نظائر من بدائيات النوى لا يمكن الوثوق بها؛ فالأمر يعتمد على أيها نختار منها. مثلًا، إذا

نظرنا إلى شجرة الآر إن إيه الريبوسومية لوويس، نجد أن البيانات متسقة مع نموذج الخلية البلعمية البدائية. السبب هو أنه في شجرة وويس تُعتَبَر حقيقيات النوى والعتائق مجموعتين «شقيقتين» تتشاركان في سلف مشترك؛ أي إن لديهما نفس «الأم». وهذا يعني أن حقيقيات النوى لم تنشأ «من» العتائق، تمامًا مثلما لا تلد الأخت أختها. كان السلف المشترك في هذه الحالة خلية بدائية النواة، وهذا أمر شبه مؤكد (وإلا فلا بد أن جميع العتائق قد فقدت نواها)، ولكن فيما وراء ذلك، لا يُوجَد سوى القليل الذي يمكننا أن نقوله يقينًا. من المحتمل أن السلسلة حقيقية النواة تطورت إلى خلية بلعمية بدائية قبل أن تبتلع الميتوكوندريا، ولكن لا يُوجَد أي دليل جيني يدعم هذا الزعم.

على العكس من هذا، إذا بنينا أشجارًا جينية أكثر تعقيدًا، مستخدمين عددًا أكبر من الجينات، فإن صلة الأخوة بين حقيقيات النوى والعتائق ستبدأ في التحطم، بل سيبدو كأن العتائق بالفعل قد تولَّدَتْ عنها حقيقيات النوى. ليس من المؤكد من أي العتائق تحديدًا تولدت حقيقيات النوى، ولكن أكبر دراسة أُجْرِيَتْ حتى الآن — التي ذكرتُ توًّا أنها بنَتْ شجرة عملاقة مكوَّنة من ٥٧٠٠ جين — توصَّلَتْ إلى أن خلية العائل كانت من العتائق، ولعلها أقرب ما تكون إلى الثرموبلازما الحديثة. هذا الفرق حاسم تمامًا؛ فإذا كانت خلية العائل من العتائق (وهو ما يعني أنها من بدائيات النوى؛ نظرًا لعدم وجود نواة، ولا هيكل خلوي فعال، ولا صفات التكاثر الجنسي ولا البلعمة الخلوية … إلخ)، فمن الواضح أنها لم تكن خلية بلعمية بدائية. وإذا كان الأمر كذلك، فلا بد أن تكون نظرية «المصادفة القدرية» صحيحة؛ بمعنى أن الخلية حقيقية النواة قد انبثقت من اتحاد بين خلايا بدائية النوى. لم يكن ثمة خلية بلعمية بدائية مطلقًا، وبهذا ينقلب غياب الدليل على وجودها إلى دليل على غيابها.

لكن ليس من المرجح أن تكون هذه الإجابة النهائية؛ إذ يعتمد الكثير على أي الجينات أو الأنواع بالضبط يتم انتقاؤها، وما هي ضوابط الانتقاء. ففي كل مرة تتغيَّر هذه الأشياء، وتعيد الشجرة تشكيل نفسها إلى نمط ذي تفرُّع مختلف، يحدث ارتباك وخلط بين الأمور بسبب افتراضات إحصائية، أو عمليات نقل جانبي بين بدائيات النوى، أو غير ذلك من المتغيرات غير المعروفة. وليس معروفًا ما إذا كان الموقف يمكن حلُّه بالمزيد من البيانات الجينية أم أنه ببساطة لا يمكن الإجابة عنه بعلم الجينات؛ وهذا هو المرادف البيولوجي لمبدأ عدم اليقين الذي وَفْقَه كلما اقتربنا من شيءٍ ما ازدادت الأشياء غموضًا. ولكن إذا لم يكن بالإمكان حل هذه المسألة بالبيانات الجينية، فهل كُتِبَ علينا أن

نبقى واقفين مُلطَّخين من كرات الوحل التي تتقاذفها حولنا فِرَق متصارعة من العلماء الذين امتلأت نفوسهم بالغل؟ لا بد أن هناك طريقة أخرى.

إن جميع الخلايا حقيقية النوى المعروفة إما تحتوي على الميتوكوندريا الآن، وإما كانت لديها في وقتٍ ما في الماضي. ومن المثير للاهتمام أن كل الميتوكوندريا التي ما زالت تؤدِّي وظيفتها المحددة — بمعنى أنها تُولِّد الطاقة مستخدمةً الأكسجين — تحتفظ في داخلها بعدد من الجينات من بقايا حياتها السابقة كبكتيريا حرة المعيشة. وفي اعتقادي أن هذا الجينوم الميتوكوندري الدقيق يخفي السر العميق للخلية حقيقية النواة.

لقد استمرَّتْ حقيقيات النوى في التشعُّب على مدى جزء كبير من المليارَيْ عام الماضية، وخلال هذا الزمن كانت تَفْقِد جيناتها الميتوكوندرية. وقد فقُدِتْ جميعها ما بين ٩٦ إلى ٩٩٫٩ بالمائة من جيناتها الميتوكوندرية، وربما نُقِلَتْ أغلبها إلى نواة الخلية، ولكن لم يحدث أن فقدَتْها جميعًا أيُّ خلية دون أن تَفْقِد — في نفس الوقت — القدرةَ على استخدام الأكسجين. هذا لا يبدو إذن أمرًا عشوائيًّا، بل إن عملية نَقْل جميع الجينات الميتوكوندرية إلى النواة عملية منطقية ومُرتَّبة. فلماذا يتم الاحتفاظ بمئات من القواعد الجينية في كل خلية، في حين أن ٩٩٫٩ بالمائة من الجينات يتم اختزانها كنسخة واحدة، مع وجود نسخة احتياطية، داخل النواة؟ وإن الاحتفاظ بأي جينات على الإطلاق في الميتوكوندريا يعني أن الجهاز — بكامله — المخصص لقراءتها وترجمتها إلى بروتينات يجب أيضًا أن يتم الاحتفاظ به في كل ميتوكوندريون بلا استثناء. لا بد أن مثل هذا التبذير من شأنه أن يزعج المحاسبين الماليين، والانتقاء الطبيعي هو أكثر المحاسبين تشددًا، أو هكذا ينبغي أن يكون.

وهناك المزيد؛ فالميتوكوندريا تُعَدُّ مكانًا غير مناسب لاختزان الجينات. غالبًا ما يُطلَق عليها — باختصار — اسم محطات توليد الطاقة بالخلية، وهذا التشبيه ملائم للغاية. فأغشية الميتوكوندريا تُولِّد شحنة كهربية، وهذه تعمل على نطاق أجزاء قليلة من المليون من المليمتر مع فَرْق جهد يساوي شحنة صاعقة من البرق، وهو أقوى ألف مرة من التيار الكهربي المنزلي. واختزان الجينات هنالك يشبه تخزين نفائس كتب المكتبة البريطانية في محطة دائمة الحركة لتوليد الطاقة النووية. والتهديد هنا ليس نظريًّا وحسب؛ فالجينات الميتوكوندرية تتطافر بسرعة تَفُوق بكثير جينات النواة. فمثلًا، في الخميرة، وهذا مثال تجريبي سهل، تتطافر هذه الجينات بسرعة تزيد بحوالي عشرة

آلاف مرة. ولكن مع ذلك، من المهم أن نعرف أنَّ الجينومَيْن الاثنين (أي جينومي النواة والميتوكوندريا) يعملان معًا بشكل سليم. ويتم توليد القوة عالية الفولتية التي تشحن الخلايا حقيقية النوى مِنْ قِبَل بروتينات يتم تشفيرها بدورها مِنْ قِبَل كلا الجينومين. فإذا أخفقا في العمل بشكل جيِّد معًا تكون العاقبة هي الموت، أي موت الخلية، وكذلك موت الكائن نفسه. ومن ثم، يجب أن يعمل الجينومان معًا لتوليد الطاقة. فأي إخفاق في التعاون بينهما ينتهي بالموت، ولكن الجينات الميتوكوندرية تتطافر بسرعة أسرع عشرة آلاف مرة من جينات النواة؛ مما يجعل ذلك التعاون المحكم قريبًا من المستحيل. هذا بالتأكيد أكثر صفة مميزة للخلايا حقيقية النوى. ولو أغفلنا هذا الأمر، معتبرين إياه مجرد نادرة من النوادر، وهو ما تتجه إليه معظم الكتب الدراسية، فهذا يشبه إغفال قرينة مهمة من القرائن. ولو كان من المفيد أن يتم التخلص من جميع الجينات الميتوكوندرية، لكان الانتقاء الطبيعي قد فعل هذا بالتأكيد قبل الآن بزمان، على الأقل بالنسبة لنوع واحد من الأنواع. لا بد إذن أن تكون تلك الجينات موجودة لحكمة ما.

لماذا يبقى الجينوم الميتوكوندري محفوظًا إذن؟ يقول العالم جون أَلِن الذي ناقشنا أفكاره في الفصل الثالث إن الإجابة ببساطة هي: للتحكم في التنفس. ولا يُوجَد سببٌ آخرُ ذو أهمية نسبية كبيرة. والتنفس يعني أشياء مختلفة لأناس مختلفين؛ فلمعظم الناس هو يعني مجرد التنفس الذي نعرفه، ولكن بالنسبة لعلماء الكيمياء الحيوية فالتنفس يُقصَد به تفاصيل عملية التنفُّس على المستوى الخلوي، وهي سلسلة من خطوات دقيقة يتم فيها التفاعل بين الغذاء والأكسجين لتوليد طاقة فولتية داخلية لها قوة البرق. ولا يمكنني التفكير في ضغط انتقائي أكثر مباشرة وفورية من التنفس، ونفس الشيء ينطبق على المستوى الجزيئي داخل الخلايا. فالسيانيد، على سبيل المثال، يُعَطِّل التنفس الخلوي ويقضي على وظائف الخلية وأنشطتها بأسرع مما يفعله كيس من البلاستيك يُربَط على الرأس لِتُكْتَم به الأنفاس. وحتى حين يعمل التنفس على نحوٍ طبيعيٍّ، فلا بد أن «يُنغَّم» بدقة بصفة مستمرة؛ مثل ضبط النغمة الموسيقية، وذلك بضبط الطاقة حسب الحاجة. وتقضي وجهة نظر أَلِن المهمة بأن أقلمة الطاقة حسب الحاجة بهذه الطريقة تتطلَّب مرجعية ثابتة، وهذا يمكن فقط تحقيقه بالتحكم «الموضعي» في النشاط الجيني. وتمامًا مثلما يجب ألا يجري التحكم في التنظيم التكتيكي لأحد الجيوش على الأرض من قبل حكومة مركزية بعيدة، فإن النواة ليست في موقع مناسب لكي تضطلع بعملية

التنغيم، بالزيادة أو النقص، لمئات عديدة من وحدات الميتوكوندريا داخل الخلية. ولذا فإن الميتوكوندريا تحتفظ بجينوم صغير لضبط التنفس، وملاءمة الطاقة للحاجة.

لم تثبت بَعْدُ صحة أفكار أَلِن، وإن كانت الأدلة تتزايد دعمًا لها. ولكن إذا قلنا إنه على صواب، فإن التبعات الضمنية تساعد في تفسير تطوُّر الخلية حقيقية النواة. فإن كان التحكم بالتنفس في الخلايا حقيقية النوى «يتطلب» عددًا من القواعد الجينية، فإن من المنطقي أن الخلية الكبيرة المُعقَّدة لا يمكنها أن تتحكم في التنفس بدونها. لتفكر الآن في الضغوط الانتقائية التي تواجه البكتيريا والعتائق؛ فكلاهما ينتج ثلاثي فوسفات الأدينوسين بنفس الطريقة مثل الميتوكوندريا، وذلك بتوليد شحنة كهربائية على أحد الأغشية بها. ولكن بدائيات النوى تستخدم غشاءها الخلوي الخارجي لهذا الغرض، وهذا يسبب لها مشكلة فيما يتعلَّق بالحجم. فتلك الكائنات تتنفس من خلال أغشيتها الخلوية. ولكي تفهم هذه المشكلة؛ فكِّر فقط في عملية تقشير البطاطس مثلًا. فإذا احتجت أن تُقشِّر طنًّا من البطاطس يجب أن تختار أكبر وحدات منها فقط، وبهذه الطريقة تحصل على أكبر كمية ممكنة من البطاطس مقارنة بالقشر. وعلى العكس من هذا فإنك تحصل على قدر أكبر من القشر إذا استخدمت البطاطس الصغيرة. والبكتيريا في هذا المفهوم مثل البطاطس، وهي تتنفس من خلال أغشيتها الخلوية؛ فكلما زادت أحجام البكتيريا، قلَّتْ قدرتها على التنفس.[٧]

نظريًّا، تستطيع البكتيريا أن تتجنَّب مصاعبها التنفسية بأن تكون لها أغشية داخلية مُولِّدة للطاقة. وهذا يحدث عمليًّا لدرجة ما، كما أوردنا سابقًا؛ فبعض البكتيريا لديها أغشية خلوية داخلية مما يعطيها مظهرًا من مظاهر حقيقيات النواة. ولكنها لا تذهب إلى أبعد من هذا كثيرًا؛ فالخلية حقيقية النواة العادية لديها أغشية داخلية مُكرَّسة لتوليد الطاقة أكثر بمئات الأضعاف حتى من أكثر أفراد البكتيريا نشاطًا. وكما هو الحال في صفات أخرى كثيرة، بدأت البكتيريا في صعود سلم التطور، ثم توقَّفَتْ بعد فترة. فلماذا؟ إنني أشتبه في أن السبب هو عدم قدرتها على التحكم في التنفس من خلال مساحة أوسع تشغلها الأغشية الداخلية. فلكي تفعل هذا سيلزمها أن تجمع وتدخر في داخلها مجموعات عديدة من الجينات، كما في الميتوكوندريا، وهذا ليس من السهل تحقيقه كله. فكل الضغوط الانتقائية الملقاة على عاتق البكتيريا — بأن تتضاعف سريعًا؛ بحيث لا يكون لديها سوى أقل جينوم ممكن — تعمل ضد البكتيريا الكبيرة المُعقَّدة.

ولكن ذلك بالضبط هو ما تفرضه البلعمة الخلوية. فالخلايا البلعمية يلزمها أن تكون كبيرة الحجم لدرجة تكفي لأن تبتلع خلايا أخرى. ولكي تنجز عملية البلعمة؛

فإنها تحتاج إلى الكثير من الطاقة حتى تتحرك، وتغير شكلها، وتلتهم فريستها. ومشكلة البكتيريا أنها كلما كبرت في الحجم، صارت أقل نشاطًا وأقلَّ قدرة على استبقاء الطاقة لإنفاقها في التحرُّك وتغيير الشكل. ويبدو لي أن البكتيريا الصغيرة القادرة على التضاعف السريع يمكنها أن تسود على البكتيريا الأكبر حجمًا والأقل نشاطًا في كل مرة بشكل ملموس، وذلك قبل أن تتمكن تلك الخلية الأكبر من أن تُطوِّر جميع الخصائص متعددة الجوانب للخلية البلعمية.

إلا أن نظرية «المصادفة القَدَرية» هي شيء مختلف؛ ففيها يعيش اثنان من الخلايا بدائية النوى معًا في تناغم أيضي متبادل، وكلٌّ منهما تُقَدِّم للأخرى خدمةً ما. وتُعتبَر العلاقات التكافلية من هذا النوع شائعة بين بدائيات النوى، لدرجة أنها تكون القاعدة وليس الاستثناء. أما ما يُعتبَر أمرًا شديد الندرة، ولكن تمَّ تسجيل حدوثه في بدائيات النوى، فهو الابتلاع الحقيقي من أحد الشريكين للآخر. فإذا حدث هذا بالفعل؛ فإن الخلية بكاملها، بما فيها البكتيريا التي داخلها، تتطوَّر حينئذٍ ككيان واحد. وبينما يستمر كلٌّ منهما في تقديم الخدمة للآخر، يحدث تآكل تدريجي للصفات الزائدة عن الحاجة، إلى أن يُترَك للبكتيريا التي تَمَّ إدخالها مهمة بسيطة وحسب تُؤدِّيها لخلية العائل، ألا وهي توليد الطاقة؛ وذلك في حالة البكتيريا التي تحوَّلَتْ إلى ميتوكوندريا.

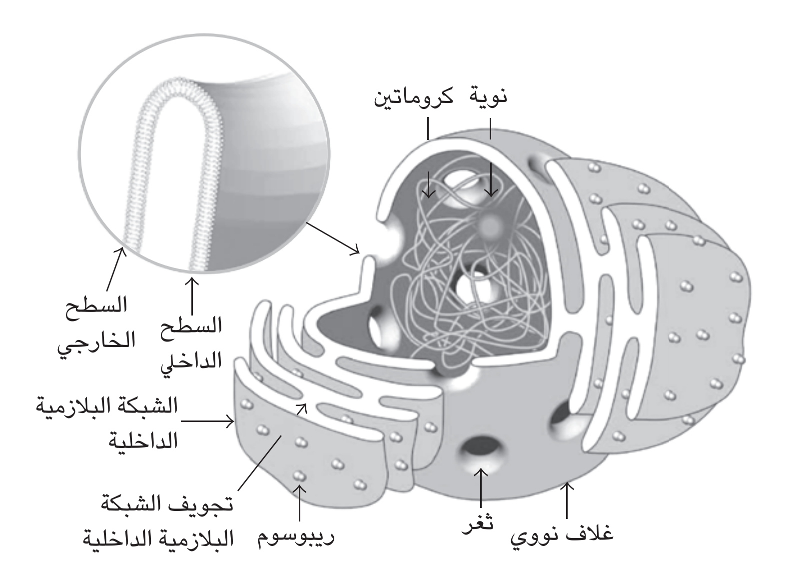
وتتمثَّل الميزة الهائلة التي قدَّمَتْها الميتوكوندريا، بل والسبب الذي مكَّنَ الميتوكوندريا من التطوُّر من الأساس، في أنها أتاحت منظومة جاهزة من الأغشية الداخلية النشطة، إضافة إلى قواعد من الجينات المطلوبة للتحكُّم في التنفُّس موضعيًّا. وما إن امتلكت خلية العائل الميتوكوندريا حتى استطاعت حينئذٍ فقط أن ترفع درجتها لتصبح خلية بلعمية كبيرة نشطة دون أن تتكبد خسارة فادحة في الطاقة. وإذا كان هذا كله صحيحًا، فإن الخلية البلعمية البدائية التي تعوزها الميتوكوندريا لم يكن لها وجود قط؛ لأن خاصية البلعمة الخلوية لا تكون ممكنة بغير الميتوكوندريا.[٨] وقد تَمَّ تشكيل الخلية حقيقية النواة من اتحاد بين خليتين من بدائيات النوى. وقد أَوْقَفَ هذا الاتحادُ ضغوطَ الطاقة التي كانت تُجبِر البكتيريا على أن تبقى كما هي باستمرار. وبمجرد إيقاف تلك الضغوط، انفتح طريق جديد للحياة — وهو البلعمة الخلوية — وصار متاحًا لأول مرة. ولقد نشأت الخلية حقيقية النواة دفعة واحدة فقط؛ لأن اتحاد اثنين من بدائيات النوى — بحيث تدخل خلية في الأخرى — هو حَدَث نادر حقًّا؛ مصادفة قدرية بالفعل. فكل ما نَعْتَزُّ به في هذه الحياة وكل عجائب الدنيا تنبع من حدث واحد كان تجسيدًا مقصودًا للمصادفة وللضرورة.

في بدايات هذا الفصل أوردتُ أنَّنا لن نستطيع أن نفهم أو نُفسِّر أصل الخلية حقيقية النواة إلا حينما ندرك أهمية رمزها المميز؛ وهو النواة ذاتها. ومن ثم يجب الآن أن نعرض للنواة لكي نختتم هذا الفصل.

شأنها شأن الخلية حقيقية النواة نفسها، كان أصل النواة ولا يزال موضوعًا لقَدْرٍ هائلٍ من الأفكار والنظريات، بدءًا من أنها كانت فقاقيع بسيطة نشأت على الغشاء الخلوي، إلى أنها نتاج لابتلاع خلايا بكاملها. وأغلب هذه الأفكار يسقط عند أول عقبة. فمثلًا، لا يدرك الكثيرون البنية الحقيقية الدقيقة للغشاء النووي؛ فهو ليس غشاء مستمرًّا، مثل الغشاء الخلوي الخارجي لأي خلية، ولكن سلسلة من الحويصلات المسطحة المثقبة بثغور كبيرة نسبيًّا، وهذه تتصل بأغشية داخلية أخرى داخل الخلية (انظر الشكل ٤-٦). ولا تُقَدِّم الافتراضاتُ الأخرى أيَّ أسس تُفَسِّر السبب في أن الخلية تكون أفضل إذا كانت فيها نواة مما لو كانت بغيرها. والإجابة التقليدية التي تقول إن غشاء النواة يحمي الجينات تُثِير تساؤلًا آخر هو: ضد ماذا؟ السرقة أم الاعتداء الخارجي؟ ولكن إذا كان ثمة أي ميزات انتقائية عامة تُحبِّذ وجود نواة، مثل التلف الجزيئي، فلماذا لا يُوجَد أي نوع من البكتيريا لديه نواة؟ علمًا بأن بعضها، كما عرفنا من قبل، لديه أغشية داخلية تَفِي بتلك الحاجة.

وفي مواجهة ندرة الأدلة القوية، أودُّ أن أعرض فرضية تخيلية رائعة أخرى، قَدَّمَها الثنائي البارع الذي صادفناه في الفصل الثاني؛ بيل مارتن ويوجين كونين. ولفكرتهما ميزتان عظيمتان؛ فهي تُفَسِّر السبب في أن النواة يجب أن تنشأ في خلية هجينة بصفة خاصة، وبالذات التي يكون نصفها عتائق ونصفها بكتيريا (وهو، كما عرفنا سابقًا، الأصل الأكثر مصداقية للخلية حقيقية النواة ذاتها). وهي تفسر السبب في أن نوى جميع الخلايا حقيقية النوى، في الواقع، يجب أن تمتلئ بالدي إن إيه حتى لو لم تكن تشفر لأي شيء، وهي في ذلك تختلف تمامًا عن البكتيريا. وحتى لو كانت الفكرة خطأً، فأعتقد أنها من «نوعية» الأفكار التي ينبغي أن ننشدها، وهي تعرض مشكلة حقيقية تواجه حقيقيات النوى المبكرة التي يجب أن تحلها بشكلٍ ما. وهذه هي نوعية الأفكار التي تُضِيف السحر إلى العلم، وأتمنَّى أن تكون صحيحة.

تدبَّرَ مارتن وكونين تركيبةَ «الجينات المقطعة» العجيبة التي تتسم بها الجينات حقيقية النوى، وهو الاكتشاف الذي جاء بوصفه واحدًا من أكبر مفاجآت علم الأحياء في القرن العشرين. فبدلًا من أن تترتَّب الجينات حقيقية النوى في خطوط بشكل منتظم



شكل ٤-٦: البنية الدقيقة للغشاء النووي، الذي يتَّصِل بأغشية أخرى بالخلية (وبالذات الشبكة البلازمية الداخلية). يتكوَّن الغشاء النووي من هذه الحُوَيْصلات حين تلتحم معًا، ولا يُوجَد أي تشابه في التركيب بين هذا الغشاء والغشاء الخارجي لأي خلية؛ بما يؤكِّد أن النواة لم تكن مشتقة من خلية تعيش داخل أخرى.

مثل الجينات البكتيرية، فإنها تنقسم إلى فتات وقِطَع تَفْصِل بينها تسلسلاتٌ غير مشفِّرة. وهذه التسلسلات غير المشفرة تُسمَّى «المناطق داخل الجين» أو «الإنترونات»، ولم يدخل تاريخها التطوري الذي طالما حيَّرَ العلماء إلى دائرة الضوء إلا مؤخرًا.

بالرغم من وجود فروق كثيرة بين الإنترونات، فإننا الآن نعرف بعض التفاصيل المشتركة التي تكشف عن أنَّ سَلَفها المشترك هو نوع من «الجينات القافزة»، وهذا النوع قادر على أن يُصِيب جينومًا ما بالعدوى بأن يضاعف نفسه بلامبالاة كأنه جين أناني مجنون لا يهتم إلا بنفسه، وحيلته بسيطة إلى حدٍّ ما؛ فحينما تتمُّ قراءة الجين القافز على أنه من الآر إن إيه، وعادة ما يكون هذا جزءًا من تسلسل أطول، فإنه ينطوي تلقائيًّا إلى شكل يشبه مقصًّا من الآر إن إيه ويَفْصل نفسه عن الشريط الأطول، ثم يعمل كقالب ليولِّد نفسه بشكل متكرر على صورة دي إن إيه. ويتم إدخال الدي إن إيه الجديد إلى

الجينوم، وذلك بطريقة شبه عشوائية؛ لتتكوَّن نُسَخ مطابقة للجين الأناني الأصلي. وثمة أنماط كثيرة من الجين القافز، وهي أنواع عجيبة أساسها واحد. وقد تَمَّ التأكيد على نجاحها التطوُّري المذهل من جانب مشروع الجينوم البشري وغيره من الجهود الهادفة لتحديد التسلسل الجيني. إن حوالي نصف الجينوم البشري يتكوَّن من جينات قافزة أو بقاياها البالية (الطافرة). وفي المتوسط، تَحْوي جميعُ الجينات البشرية في داخلها ثلاثةَ جينات قافزة أنانية؛ ميتة أو حيَّة.

بطريقةٍ ما، يكون الجين القافز «الميت» — وهو الذي فَسَد وذَوَى لدرجة أنه لم يَعُدْ قادرًا على «القفز» — أسوأ من الجين القافز «الحي». فعلى الأقل، الجين القافز «الحي» يَفْصِل نفسه عن الآر إن إيه دون أن يُسبِّب ضررًا حقيقيًّا، أما الجين الميت فإنه يبقى مكانه كقاطع طريق. فإذا لم يستطع أن يفصل نفسه، تكون خلية العائل مضطرة للتعامل معه، وإلا فقد يتحوَّل إلى بروتين ويسبب أضرارًا للخلية. ولقد ابتكرت الخلايا حقيقية النوى طريقةً لفصل أي آر إن إيه غير مطلوب في فترة مبكرة من تطوُّرها. وعلى نَحْوٍ مثير للاهتمام، تتلقَّف هذه الخلايا ببساطة مقص الآر إن إيه من الجين القافز، فتُجَنِّده وتشحنه بالبروتينات. وكل حقيقيات النوى الحية — من النباتات إلى الفطريات إلى الحيوانات — تستخدم هذا المقص العتيق لفَصْل الآر إن إيه غير المشفر. وبهذا نكون في مواجهة موقف غير عادي، تكون فيه جينومات الخلايا حقيقية النوى مُرصَّعة بالإنترونات المشتقة من جينات قافزة أنانية. وهذه تُفصَل عن الآر إن إيه في كل مرة يتم فيها التعامل مع أحد الجينات باستخدام مقص الآر إن إيه مسروق من الجينات القافزة ذاتها. وتكمن المشكلة — والسبب في علاقة تلك المشكلة بموضوع أصل النواة — في أن ذلك المقص العتيق بطيء القص شيئًا ما.

على العموم، لا تتحمَّل بدائيات النوى وجود الجينات القافزة ولا الإنترونات؛ ففي بدائيات النوى لا يُوجَد فَصْل بين الجينات نفسها وبين الجهاز المخصص لبناء بروتينات جديدة. ففي غياب النواة، تختلط الآلات البانية للبروتينات، أي الريبوسومات، بمادة الدي إن إيه ويتم التعامل مع الجينات ضمن قالب آر إن إيه، وذلك يُترجَم في آنٍ واحدٍ إلى بروتين. المشكلة أن عملية بناء البروتينات على يد الريبوسومات سريعة جدًّا، بينما يكون مقص الآر إن إيه الذي يتخلَّص من الإنترونات بطيئًا. ففي الوقت الذي يكون فيه المقص قد فصل أحد الإنترونات، تكون البكتيريا قد بَنَتْ عدة نسخ معيبة وظيفيًّا من البروتين المعتمد على الإنترون. ليس معروفًا كيف تخلص البكتيريا نفسها من الجينات

القافزة والإنترونات (ويمكن معرفة ذلك بتنقية عملية الانتقاء ضمن مجموعات كبيرة من البكتيريا)، ولكن الواقع يقول إنها تستطيع ذلك، وأغلب البكتيريا تمكَّنَتْ من طرد جميع الجينات القافزة والإنترونات تقريبًا، وإن كان بعضها، بما فيها أسلاف الميتوكوندريا، لا يزال لديها بعضها. وحتى تلك البكتيريا يكون لديها فقط حوالي ثلاثين نسخة بكل جينوم، مقارنة بكميات هائلة تصل إلى آلاف أو ملايين النسخ في جينوم الخلية حقيقية النواة!

يبدو من الظاهر أن السلف الهجين لحقيقيات النوى قد استسلم لغزو من الجينات القافزة الآتية من الميتوكوندريا الخاصة به. ونحن نعرف هذا؛ نظرًا لأن الجينات القافزة في حقيقيات النوى تشابه في بنيتها تلك القليلة التي في البكتيريا. وفضلًا عن هذا، فإن أغلب الإنترونات في حقيقيات النوى الحية تُوجَد في نفس المكان تمامًا ضمن جينات حقيقيات النوى من الأميبا إلى النبات الشوكي، ومن الذبابة إلى الفطر إلى الإنسان. من المفترض أنه حدثت عدوى شاملة مبكرة من الجينات القافزة، التي نسخت نفسها في أنحاء الجينوم، ثم «ماتت» في نهاية أمرها وفسدت مُتحوِّلة إلى إنترونات ثابتة داخل سلف مشترك لجميع حقيقيات النوى. ولكن لماذا تندفع الجينات القافزة كالمسعورة داخل تلك الخلايا حقيقية النوى المبكرة؟ أحد الأسباب هو أن الجينات القافزة البكتيرية كانت تلهو وتتقافز على كروموسوم خلية العائل، من العتائق، الذي من الواضح أن لم تكن لديه فكرة عن كيفية التعامل معها. وسبب آخر هو أن المجموعات الأولى من الخلايا الهجينة لا بد أنها كانت صغيرة، ومن ثم لم يعمل الانتقاء التطهيري الذي يتخلَّص من العيوب الموجودة في أي مجموعات كبيرة من البكتيريا.

وأيًّا كان السبب، فإن حقيقيات النوى المبكرة واجهت مشكلة عويصة؛ إذ كانت موبوءة بالإنترونات، وكثير من تلك بدوره كان قد أُدْخِل ضمن بروتينات؛ وذلك لأن مقص الآر إن إيه لم يستطع أن يفصلها بسرعة كافية. صحيح أن ذلك الموقف لا يقتل الخلايا بالضرورة — إذ إن البروتينات التي اختلَّتْ وظيفيًّا تتحلل وفي نهاية الأمر ينهي «المقص» البطيء مهمته حتى يتم إنتاج بروتينات صالحة وظيفيًّا — إلا أنه تضمَّنَ قَدْرًا كبيرًا من الفوضى بالتأكيد. ولكن كان يُوجَد حلٌّ واضح أمام تلك الخلايا المشوشة. فكما يقول مارتن وكونين، هناك وسيلة بسيطة لاستعادة النظام، ولإنتاج بروتينات صالحة وظيفيًّا طوال الوقت، وهي أن نتأكد من أن «المقص» يحصل على وقتٍ كافٍ لينهي مهمته في القص قبل أن تتابع الريبوسومات مُهمَّتَها في بناء البروتينات. بتعبير آخر، أن

نتأكد من أن الآر إن إيه، مع إنتروناته، يتَّجِه أولًا إلى المقص، وحينئذٍ فقط يتم تمريره إلى الريبوسومات. وهذا الانفصال في الوقت يمكن تحقيقه ببساطة بانفصال مكاني، وذلك باستبعاد الريبوسومات من جوار الدي إن إيه. فكيف يتم هذا؟ يتم باستخدام غشاء به فتحات واسعة نسبيًّا! فإذا خصصت الخلية غشاءً موجودًا بالفعل، وجمعت الجينات داخله، وتأكَّدَتْ من وجود مسامات كافية لنقل الآر إن إيه إلى الريبوسومات، فسيكون كل شيء على ما يرام. وهكذا فإن النواة، التي هي الشيء المميز لجميع حقيقيات النوى، لم تنشأ وتتطوَّر لتحمي الجينات مطلقًا، على حد قول مارتن وكونين، ولكن لكي تستبعدها من مصانع بناء البروتينات في السيتوبلازم.

قد يبدو هذا الحل حادًّا ومتسرعًا (وإن كان مفيدًا من المنظور التطوُّري) ولكنه قدَّم على الفور بعض المزايا؛ فبمجرد أن تصير الجينات القافزة مأمونة لا تُشكِّل تهديدًا، فإن الإنترونات نفسها تتحوَّل إلى نعمة بدلًا من أن تكون نقمة. السبب الأول هو أنها مَكَّنَت الجينات من التجمُّع معًا بشكل مختلط، بطرق مختلفة وغير عادية، فأنتجت خليطًا «فسيفسائيًّا» من البروتينات الفعالة، وهو مظهر أساسي لجينات حقيقيات النوى اليوم. فإذا كان جين مُعيَّن يتكوَّن من خمس مناطق تشفيرية مختلفة، فإن الإنترونات يمكن فصلها بطرق مختلفة؛ مما يعطي تشكيلة من البروتينات ذات الصلة من نفس الجين. وإذا كان هناك حوالي ٢٥ ألف جين فقط في الجينوم البشري، فإنها عند خلطها عشوائيًّا — بالطريقة المذكورة توًّا — ينتج عنها ما لا يقل عن ٦٠ ألف بروتين مختلف، وهي ثروة من الاختلاف والتباين. فإذا كانت البكتيريا هي أكثر الكائنات تحفظًا، فإن الإنترونات حَوَّلت حقيقيات النوى إلى كائنات دائمة التجريب بلا هوادة!

ثمة نعمة أخرى، هي أن الجينات القافزة مكَّنَتْ حقيقيات النوى من أن تزيد حجم جينوماتها. فبمجرد أن اتخذت حقيقيات النوى الأسلوب البلعمي للحياة، لم تَعُدْ مُقيَّدة بأسلوب الكدح على طول الزمان الذي يُمَيِّز الحياة البكتيرية، ولا سيما حاجتها لكبح أنفسها بهدف التضاعف السريع. لم يَعُدْ يتعيَّن على حقيقيات النوى أن تتنافس مع البكتيريا، بل يمكنها أن تلتهمها وتهضمها في داخلها في وقت فراغها. وحينما تحرَّرَتْ حقيقيات النوى الأولى تلك من الحاجة إلى السرعة، استطاعت أن تجمع وتركُم الدي إن إيه والجينات، مع إعطائها مجالًا لمزيد هائل من التعقيد. وقد ساعدت الجينات القافزة على زيادة حجم جينومات حقيقيات النوى إلى آلاف الأضعاف أكثر من الحجم البكتيري العادي. صحيح أنَّ قَدْرًا كبيرًا من الدي إن إيه الزائد كان قليل الفائدة، فإن بعضه

تعاوَنَ لتشكيل جينات وتسلسلات تنظيمية جديدة. وتَبِع ذلك قَدْرٌ أكبرُ من التعقيد كأثر جانبي.

لا أبالغ إذا تحدثت عن حتمية الحياة المعقدة على الأرض أو حتمية الوعي الإنساني؛ فالعالم ينقسم إلى قسمين: بدائيات النوى طويلة الأمد، وحقيقيات النوى المتنوعة والمتعددة الأشكال والألوان. ويبدو أن الانتقال من الأولى إلى الثانية ليس تطورًا تدريجيًّا، وليس صعودًا بطيئًا نحو التعقيد؛ إذ هناك مجتمعات لا حصر لها من بدائيات النوى تظهر عليها كل علامات التنوع. بالتأكيد هناك مجتمعات شاسعة من البكتيريا ملكَتْ طرقًا كثيرة من التنوع والنجاح بوصفها بكتيريا، ولكنها بقيت هكذا على الدوام؛ فهي مقيدة بعدم قدرتها على زيادة حجمها وطاقتها في نفس الوقت. ولم يكسر حاجز الفشل هذا إلا حَدَثٌ نادر عَرَضي؛ وهو تعاون بين خليتين من بدائيات النوى، دخلت إحداهما بطريقة ما في الأخرى. إنها مصادفة عجيبة. وقد واجهت الخلية الهجينة الجديدة العديد من المشكلات، ولكن تحقق لها شيء جديد ومهم من الحرية الرائعة؛ وهي الحرية في الزيادة في الحجم دون التعرض لعقوبة تضر بطاقتها ونشاطها قد تسبب لها العجز والتوقف، والحرية في أن تصير خلية بلعمية، وتخرج عن الطوق البكتيري. ولما واجهتها مشكلةُ تفشِّي الجينات الأنانية، فلربما لم يقتصر الحل السعيد على مجرد تكوُّن نواة للخلية ولكن الميل كذلك إلى جمع الدي إن إيه وإعادة ضمِّه ضمن تلك الكوكبات الرائعة التي لا حصر لها من الكائنات التي تعيش حولنا. وهذه مصادفة أخرى. يبدو إذن أن هذا العالم من الروائع حولنا قد انبثق عن مصادفتين مقصودتين كبيرتين، وعلى هذه الخيوط الرقيقة تتعلق أقدارنا. وإنه من حسن حظنا أننا نعيش جميعًا هنا من الأساس.

الفصل الخامس

التكاثر الجنسي

أعظم يانصيب في العالم

يُعزَى الكثير من الحكايات والنوادر، الحقيقي منها وغير الحقيقي، للكاتب المسرحي الأيرلندي الراحل جورج برنارد شو. ومن تلك الحكايات أن ممثلة جميلة قابلته ذات مرة في إحدى الحفلات،[1] وراودته عن نفسه، قائلة له في دلال وهي تضحك: «يجدر بنا يا عزيزي أن ننجب طفلًا؛ إذ سينعم بجمالي الفتَّان ويَرِثُ عنك عقلك العبقري.» فردَّ عليها شو قائلًا في سخرية: «حسنًا، ولكن ماذا سيكون الحال إذا ورث جمالي أنا وعقلك أنت؟!»

كان لدى شو وجهة نظر صائبة؛ فالتكاثر الجنسي هو أكثر العوامل المعروفة بثًّا للعشوائية في الجينات الناجحة، وربما كانت تلك القوة العشوائية هي التي أدَّتْ في المقام الأول إلى ظهور شخصية نابغة مثل شو أو ممثلة فاتنة مثل تلك المرأة. ولكن مثلما يقدر التكاثر الجنسي على هندسة توليفة ناجحة من الجينات وتجميعها، يمكن بنفس الدرجة ألا يحقق إلا تركيبة فاشلة أو مُخيِّبة للآمال. وقد وقعت منظمة سيئة السمعة، تُسمَّى «بنك نوبل للسائل المنوي»، في ذلك الفخ تمامًا؛ فهو بنك يجمع السائل المنوي للحاصلين على جوائز نوبل. فلما دُعِيَ عالم الكيمياء الحيوية جورج والد كي يتبرع بسائله المنوي للبنك باعتباره ممن فازوا بجائزة نوبل في الكيمياء، رفض قائلًا إنهم ربما كانوا بحاجة لأناس مثل أبيه، الذي كان خياطًا من المهاجرين الفقراء ولم يكن يفكر لحظة أنه سيخرج من صلبه ينبوع للعبقرية. واستطرد قائلًا: «ولكن بماذا جاء سائلي المنوي للعالم؟ لقد أنجبت ولدين، كانا مجرد عازفَيْ جيتار عاديين!» صحيح أن صفة

العبقرية، أو الذكاء والألمعية بصفة عامة، قابلة للتوارث بالتأكيد (بمعنى أن الجينات الوراثية تؤثِّر على نتاج الإنجاب، ولا تحدِّد ماهيته بشكل مؤكد) إلا أن التكاثر الجنسي يجعل الأمر كله بمنزلة يانصيب لا يمكن التنبؤ بما سيُسفِر عنه.

معظمنا يشعر أن سحر الجنس (بوصفه صورة من صور التكاثر) يكمن في هذه القدرة تحديدًا على تحقيق التنوع والاختلاف، وإخراج كائن فريد من القبعة في كل مرة. ولكن بدراسة الأمر من منظور أحد أخصائيي علم الوراثة والرياضيات يكون من الواضح للغاية أن مراعاة التنوع لمجرد التنوع هو أمر غير محمود. فلماذا نخاطر بإفساد مزيج ناجح؟ لمَ لا نستنسخه وحسب؟ إن استنساخ شخصية فذَّة لامعة مثل موتسارت أو برنارد شو ربما يصدم مشاعر معظم الناس، معتبرين إياه تحدِّيًا للرب، وتلاعبًا بكائناته، وأنه مظهر خطر لغرور الإنسان وتفاخره بنفسه، وزهوه بقدراته التي منحه الرب إياها. ولكن هذا ليس ما يفكر به علماء الوراثة، فوجهة نظرهم أكثر التصاقًا بالدنيا؛ إذ يقولون إن ذلك التنوع غير المحدود وغير المحسوب، الذي يُحْدِثه الجنس، يمكن أن يؤدي بشكل مباشر إلى مشكلات البؤس والمرض، ثم الموت نتيجة لهما. أما الاستنساخ البسيط فلا يُنتظَر منه هذا. فالاستنساخ، عن طريق حفظ توليفات جينية تُوضَع في بوتقة الانتقاء، غالبًا ما يكون الرهان الأفضل.

ولنضرب مثالًا واحدًا: هو مرض أنيميا الخلايا المنجلية. هذا المرض مرض جيني (وراثي) خطير؛ إذ تلتوي خلايا الدم الحمر في شكل يشبه المنجل الصلب، الذي لا يمكنه أن ينضغط داخل الشعيرات الدموية الرفيعة. وينتج هذا المرض عن وراثة نسختين «معيبتين» من أحد الجينات. لماذا لا يقوم الانتقاء الطبيعي بطرد الجين المعيب؟ الإجابة هي أن وجود نسخة واحدة من هذا الجين المعيب أمر مفيد حقًّا! فإذا ورثنا نسخة «سليمة» وأخرى «معيبة» من أبوَيْنا، فلن تقتصر النتيجة على «عدم» معاناتنا أنيميا الخلايا المنجلية، بل إننا سنكون أيضًا أقل قابلية للإصابة بالملاريا، وهو مرض آخر يؤثر على خلايا الدم الحمراء؛ إذ إن وجود نسخة سيئة معيبة واحدة من جين الخلايا المنجلية يؤدي إلى تغيير طبيعة أغشية خلايا الدم الحمراء، بما يمنع دخول طفيليات الملاريا من خلالها، وذلك دون تحويل الخلايا إلى الشكل المنجلي الضار. والاستنساخ (أي التكاثر اللاجنسي) يمكنه توريث هذا النمط الجيني «المختلط» والمفيد في كل مرة، أما التكاثر الجنسي فيخلط (أو بالأحرى «يلخبط») الجينات عشوائيًّا دون هوادة. فإذا افترضنا أن كلا الأبوين لديه هذا النمط الجيني المختلط، فإن حوالي نصف عدد أطفالهما يرث هذا

النمط الجيني، ولكن يتلقى الربع نسختين «معيبتين» من الجين؛ مما يتسبب في إصابته بأنيميا الخلايا المنجلية، بينما ينتهي الأمر بالربع الآخر بحصوله على نسختين «جيدتين» من الجين؛ مما يجعله مُعرَّضًا بدرجة عالية للإصابة بالملاريا، على الأقل إذا عاشوا في أي مكان من الأماكن الكبيرة من العالم التي تستوطن فيها بعوضة الأنوفيليس (التي تنقل المرض). وبتعبير آخر، فإن التنوع الكبير يعرض ما لا يقل عن نصف تعداد السكان لخطر الإصابة بأمراض خطرة؛ فالتكاثر الجنسي يمكن أن يُعَرِّض حياة البشر للخطر بشكل مباشر.

وهذا ليس العيب الوحيد للتكاثر الجنسي، بل في الواقع إن قائمة عيوبه وأضراره ينبغي أن تجعل أي شخص عاقل يُبْعِد عن عقله هذه الفكرة للأبد. ولقد أَلَّفَ جاريد دياموند ذات مرة كتابًا بعنوان «لماذا يكون الجنس ممتعًا؟» ومن الغرابة أنه أغفل تقديم الإجابة. فلا بد أنه فكَّرَ أنها بديهية واضحة؛ فلو لم يكن الجنس ممتعًا، لَمَا أَقْبَل أحدٌ سليمُ العقل عليه، وربما لَمَا أَقْبَل الناس على الزواج، ومِنْ ثمَّ ما كنا أتينا إلى هذه الدنيا.

ولنتخيَّل الآن أن شو ألقى بحذره المعهود أدراج الرياح، وغامر بحظه للحصول على طفل ذي عبقرية وجمال. وسوف نتخيَّل أيضًا — ربما بشكل غير عادل، ولكن لغرض التوضيح — أن تلك الممثلة قد عاشت طبقًا للسمعة الشائعة (المشبوهة) عن مهنتها. من المرجح أنها أُصِيبَتْ بمرض تناسلي، وليكن الزهري وأن لقاءهما تمَّ قبل اكتشاف المضادات الحيوية، وقبل أن يفقد الزهري الكثير من تأثيره المخيف في نفوس أناس محطمين من جنود وموسيقيين وفنانين، الذين كانوا يترددون على نساء على شاكلتهم من نساء الليل. في ذلك العصر الماضي كانت الإصابة بمضاعفات الزهري المخيفة مثل الجنون — التي لحقت رموزًا مثل نيتشه وشومان وشوبرت — بمنزلة عقوبة حقيقية على الانغماس في الشهوات الجنسية. وفي تلك الأيام كانت العلاجات غير المجدية — مثل الزرنيخ أو الزئبق — مقاربة في أضرارها للمرض الأصلي. حتى كان يُقال في ذلك الزمن إن ليلةً يقضيها المرء في أحضان امرأة قد تنتهي به إلى قضاء باقي حياته مريضًا.

بالطبع ما الزهري إلا مرض واحد فحسب من الأمراض التناسلية المخيفة الكثيرة، مثل الإيدز، الذي تفشى وانتشر عبر مناطق كثيرة من العالم. وإن ارتفاع معدلات الإصابة بالإيدز في الدول الأفريقية الواقعة جنوب الصحراء الكبرى يصيب الإنسان بالخزي والهلع معًا. ففي لحظتنا هذه يعاني حوالي ٢٤ مليون أفريقي من عدوى فيروس نقص المناعة البشري؛ أي ما يوازي نحو ٦ بالمائة من صغار البالغين. وتَصِل معدلات الإصابة

بالعدوى لدى الدول الأشد ابتلاء به إلى ما يزيد عن ١٠ بالمائة، مع انخفاض في متوسط أعمار المصابين بأكثر من عشر سنين. وتتضاعف تلك الكارثة حقًّا بفعل عوامل مثل عدم كفاءة العلاج، والفقر والمجاعات والإصابة بأمراض أخرى إضافية مثل الدرن، ومع ذلك تُشكِّل الممارسات الجنسية العشوائية الجزء الأكبر من المشكلة.[٢] ولكن أيًّا كان السبب، فإن النطاق الهائل للمشكلة يَشِي بما يُمثِّله الجنس من حماقة.

لكن دَعْنا نعود إلى شو، فلو كان قد واقَعَ الممثلةَ دون تحرُّز لكان من المحتمل أن ينتج طفلًا فيه أسوأ صفات والِدَيْه، وربما أدَّى به ذلك إلى المرض والجنون. إلا أن شو كان كذلك يتمتع ببعض المميزات بخلاف ظروف الكثيرين من الناس. فحينما غازلته تلك الممثلة، كان بالفعل غنيًّا ومشهورًا، فلم يكن محورًا للحكايات فحسب، ولكن — كما يقولون في الأسلوب الحديث — كان مغناطيسًا للآنسات صغيرات السن أيضًا. وإذا أذعن لغريزة الجنس فستجد جيناته أرضًا خصبة في تلك النسوة، ولن يُضطَر لملاقاة الهوان والعذاب اللذين يعانيهما الكثيرون في بحثهم عن الشريك المناسب أو أي شريك على الإطلاق.

لا أريد أن أدخل في نقاش عن التكاليف العالية للممارسة الجنسية؛ فمن الواضح أن هناك تكلفة ما للعثور على شريك، ومن ثم لنَقْل الجينات إلى الطرف الآخر. ولا أعني التكلفة المالية — وإن كان هذا ملاحظًا تمامًا لكل من يواعد فتاة للمرة الأولى، أو يسعى جاهدًا لإنهاء إجراءات طلاقه — ولكن هناك تكلفة يتعذر تعويضها فيما أُهدِر من وقت وعواطف، وتظهر جلية في عمود «القلوب الوحيدة» بالصحف والمجلات، وفي انتشار صفحات المواعدة على الإنترنت. إلا أن التكلفة الحقيقية، وهي التكلفة البيولوجية، يصعب إدراكها في المجتمعات الإنسانية؛ لأنها مدفونة تحت طبقات من الثقافة وآداب السلوك. وإذا كنت تشكك في وجود تكلفة بيولوجية، فلنفكر فقط في ذيل الطاووس، بريشه الرائع، الذي هو رمز لخصوبة الذكر ولياقته، فإنه بلا شك يُمثِّل — بحجمه الكبير وألوانه الخلابة — مشكلة تعوق بقاءه على قيد الحياة، ونفس الأمر ينطبق على سائر الطيور الكثيرة التي تستعرض جمالها الرائع وألوانها الزاهية. ولعل أقوى مثال من بين كل الأمثلة هو طائر الطنان؛ فهذا الطائر العجيب يَصِل عدد أنواعه إلى ٣٤٠٠ نوع جميعها تدفع ثمن العثور على شريك للحياة، ليس للطائر الطنان نفسه (وإن كان هذا الأمر صعبًا عليه بلا شك) ولكن للنباتات المزهرة.

بسبب ثباتها في الأرض بفعل الجذور، قد تكون النباتات أبعد الكائنات عن المخيلة من حيث الاهتمام بالجنس، ومع ذلك فالسواد الأعظم منها يهتم بالجنس اهتمامًا

بالغًا، باستثناء الهندباء البرية، ومعها قليل من الأنواع الأخرى، التي تُضرِب عن الجنس صفحًا. أما باقي النباتات فتجد لها سبيلًا لذلك، وأروعها تلك النباتات المزهرة ذات الجمال الخلاب التي ملأت العالم منذ حوالي ٨٠ مليون عام، حوَّلَتْ خلالها الغابات بلونها الأخضر الرتيب إلى لوحة مفعمة بألوان الأزهار المبهجة التي نراها اليوم. ومع أن أول نشوء لها كان في أواخر العصر الجوراسي، منذ نحو ١٦٠ مليون عام، فإن انتشارها في أنحاء العالم تأخَّرَ كثيرًا، ثم ارتبط في نهاية الأمر بظهور الحشرات اللاقحة، مثل النحل. وتُعَدُّ الأزهار تكلفة إضافية للنبات؛ إذ يتعيَّن عليها أن تجتذب الحشرات اللاقحة بألوانها الفاقعة وأشكالها الجميلة، وأن تنتج رحيقًا حلوًا لتشجع الكائنات اللاقحة على زيارتها (يحتوي رحيق الأزهار على ربع وزنه سكرًا)، وأن تتوزع في الحقول بدقة وبراعة؛ فلا تكون شديدة التقارب (وإلا زاد معدل التلقيح الذاتي وصار التكاثر الجنسي بلا معنى) ولا شديدة التباعد (حتى لا تنفر الكائنات اللاقحة فلا تأتي لأداء مهمتها). وما إن يستقر النوع الزهري على كائن لاقح معين حتى يتطوَّرا معًا يدًا بيد، وكلاهما يفرض عبئًا وكلفة على الآخر ويمنحه فوائد بالمقابل. ولا تُوجَد كلفة أو ثمن أفدح مما يدفعه ذلك الطائر الضئيل المسمى بالطنان من أجل الحياة الجنسية للنباتات الساكنة.

هذا الطائر الطنان يجب أن يكون ضئيلًا، فلو كان أكبر حجمًا لما تمكَّن من التحويم دون أن ينتقل من مكانه في حلق الزهرة، مرفرفًا بجناحيه بمعدل ٥٠ ضربة في الثانية. وهذا الجمع بين الحجم الدقيق لأصغر الطيور جميعًا وبين معدل أيضه الهائل والضروري لكي يرفرف باستمرار يعني أن الطيور الطنانة ينبغي عليها أن تتزود بالوقود باستمرار تقريبًا. إنها تقوم باستخراج أكثر من نصف وزنها رحيقًا كل يوم، وتزور من أجل ذلك مئات الزهور. وإذا اضطرت للتوقُّف عن الأكل مدة طويلة نسبيًّا (أكثر من ساعتين)، فإنها تسقط مغشيًّا عليها وتروح في حالة سبات تشبه الغيبوبة، يتدهور خلالها معدلا دقات القلب والتنفس إلى أقل بكثير مما يكون أثناء النوم الطبيعي، بينما تنخفض درجة الحرارة الأساسية لأجسامها بشدة. فكأن تلك الطيور الضئيلة قد غَوَتْها الأزهار برحيقها اللذيذ فارتبطت بها ارتباطًا لا ينفصم، وهي تُحلِّق بلا كلل من زهرة إلى زهرة، وتوزِّع حبوب اللقاح أثناء ذلك، ولو حرمت الرحيق لسقطت في غيبوبة قد تنتهي بموتها.

فإذا كان كل هذا ليس سيئًا بدرجة كافية، فلا يزال هناك المزيد من الغموض يكتنف الجنس. فحتى كلفة العثور على شريك لا تُعَدُّ شيئًا يُذكَر إذا قُورِنَتْ بكلفة

الاحتفاظ بهذا الشريك؛ فتلك هي الكلفة المزدوجة المشهورة للجنس. وإن المناصرات الغاضبات لحقوق المرأة اللاتي ينتقدن مجرد وجود الرجال في هذه الدنيا يستندن إلى منطق يبدو معقولًا من الظاهر. فظاهريًّا، يُعَدُّ الرجال تكلفة ثقيلة حقًّا، والمرأة التي حلت مشكلة التوالد البِكري تستحق التقدير. وإذا كان ثمة رجال قليلون يحاولون تبرير وجودهم بتحمل أعباء رعاية الأطفال وتربيتهم، وتوفير الاحتياجات المادية، فإن هذا لا ينطبق على كثير من تلك الكائنات الأقل مستوى، سواء الذكور من البشر أو غيرهم من الكائنات؛ إذ يهرب أغلبهم من تحمُّل المسئوليات. ومع ذلك فلا تزال الأنثى الحامل تلد ذكورًا وإناثًا بنِسَب متساوية. وهكذا يضيع خمسون بالمائة من جهودها هباء في إنجاب وتنشئة ذكور عاقين في هذا العالم، يساهمون في إطالة أمد المشكلة. وأي أنثى، من أي نوع حي، وليس لها ذكر يرعاها، تستطيع أن تمضي في حياتها دون ذكور على الإطلاق وعلى طول الأمد، من شأنها أن تضاعف نجاحها التكاثري. ومن شأن سلالة من الإناث اللاتي تولدن بالاستنساخ أن تتضاعف عدديًّا في كل جيل، بحيث تمحو شركاءها الجنسيين (من الذكور) من مجموع السكان على مدى أجيال قليلة. ومن منظورٍ حسابيٍّ بَحْتٍ، تستطيع أنثى واحدة خاضعة للاستنساخ أن تحل محل عدد من السكان يصل إلى مليون من الذكور القادرين على التكاثر على مدى خمسين جيلًا فقط.

تدبَّرْ هذا الأمر على مستوى الخلايا. ففي التكاثر الاستنساخي، أو التوالد البكري، تنقسم الخلية إلى اثنتين. أما في التكاثر الجنسي فيحدث العكس؛ إذ تلتحم خلية ذكرية (الحيوان المنوي) بخلية أنثوية (البويضة) لإنتاج خلية واحدة متكاملة (البويضة المخصبة). وهكذا نجد أن خليتين جنسيتين قد أنتجتا خلية واحدة؛ أي إنه تضاعف عكسي. وتظهر التكلفة المضاعفة للتكاثر الجنسي جليًّا في أعداد الجينات. فكل من الخليتين الجنسيتين، الحيوان المنوي والبويضة، ينقل ٥٠ بالمائة فقط من الجينات حينما تندمج الخليتان الجنسيتان. وهكذا تتم استعادة النصيب الكامل من الجينات حينما تندمج الخليتان الجنسيتان. في هذا السياق، فإن الكائن الذي يجد طريقة لنقل ١٠٠ بالمائة من جيناته إلى جميع ذريته، عن طريق الاستنساخ، تكون لديه ميزة مضاعفة. ونظرًا لأن كل مستنسخ ينقل عددًا من الجينات يعادل ضعف عدد ما ينقله الكائن الممارس للجنس، فإن جينات المستنسخين لا بد أن تنتشر سريعًا بين مجموع السكان، بحيث تحل في نهاية الأمر محل جينات من يتكاثرون جنسيًّا.

والأدهى من ذلك، أنَّ نَقْل نصف جيناتك فقط إلى الجيل التالي يفتح الباب لجميع صنوف الخدع المريبة من الجينات الأنانية.[٣] ففي التكاثر الجنسي، بصفة مبدئية على

الأقل، يكون لدى جميع الجينات احتمال بنسبة ٥٠ بالمائة تمامًا لكي تنتقل إلى الجيل التالي. وهذا، من الناحية العملية، يخلق فرصة للغش والخداع؛ بحيث تعمل الجينات لمصالحها الأنانية فتنتقل لأكثر من ٥٠ بالمائة من الذرية. وهذا ليس مجرد احتمال نظري لا يحدث بالفعل، بل هناك الكثير من الأمثلة عن الصراع بين الجينات، بين الجينات «الطفيلية» التي تخرق القانون وبين غالبية الجينات التي تخدم القانون وتحتشد لتوقيفها. فهناك جينات طفيلية تقتل الحيوانات المنوية، أو حتى كل الذرية التي لا ترثها، وجينات تعقم الذكور، وجينات تُوقِف نشاط الأعداد المقابلة من الجينات الآتية من الوالد الآخر، وجينات قافزة تتكاثر في أنحاء الجينوم. فكثير من الجينومات، بما فيها الجينوم البشري، تمتلئ برفات وبقايا الجينات القافزة التي كانت قد تضاعفت من قبل في جميع أنحاء الجينوم، كما رأينا في الفصل الرابع. إن الجينوم البشري مقبرة للجينات القافزة «الميتة»، ويتكوَّن نصفه بالتحديد من جثثها البالية. بل إن الجينومات الأخرى حالها أسوأ من هذا؛ فمن العجيب أن ٩٨ بالمائة من جينوم القمح يتكوَّن من جينات قافزة ميتة. وعلى العكس من هذا، فإن أغلب الكائنات التي تستنسخ أنفسها لديها جينومات أكثر «رشاقة» ولا تسقط فريسة للجينات الطفيلية بأي حال كالذي يحدث لغيرها.

بصفة عامة، ثمة عوامل كثيرة تحتشد ضد الجنس بصفته طريقة للتكاثر. ربما يفكر عالم بيولوجيا مبدع في ظروف خاصة فريدة قد يكون فيها الجنس مفيدًا، ولكن أغلبنا، في مواجهة هذا الرأي، يشعر أنه مجبر على إغفال الجنس باعتباره شيئًا مثيرًا للاستغراب. فإنه يعرضنا لتكلفة مضاعفة معروفة، مقارنة بالتوالد البكري، وهو ينقل جينات طفيلية أنانية يمكنها أن تصيب جينومات بأكملها بالعجز، وهو يفرض عبئًا للعثور على شريك؛ وهو ينقل أشد الأمراض التناسلية إثارة للفزع، كما أنه يدمر، بشكل منتظم، جميع التوليفات الجينية الأكثر نجاحًا.

ولكن بالرغم من كل ذلك، فإن ما يثير الشعور بالإحباط أن التكاثر الجنسي يكاد يكون عالميَّ الانتشار بين جميع صور الحياة المُعقَّدة. فجميع حقيقيات النوى تقريبًا (أي المكونة من خلايا بها نوى؛ انظر: الفصل الرابع) تنغمس في التكاثر الجنسي في وقتٍ ما من دورات حياتها، والغالبية العظمى من النباتات والحيوانات تُعتَبَر جنسية إجباريًّا، بمعنى أنها تعجز عن التكاثر إلا عن طريق الجنس. وليس هذا هو الاستثناء؛ فالأنواع غير الجنسية التي تتكاثر بالاستنساخ بشكل عملي نادرة بالتأكيد، ولكن بعضها،

مثل الهندباء البرية، موجود أمام أعيننا. والحقيقة العجيبة أن كل هذه المستنسخات تقريبًا تُعتبَر أنواعًا حديثة نسبيًّا؛ إذ يميزها أنها انبثقت منذ آلاف وليس ملايين السنين. إنها أصغر الفروع في شجرة الحياة، ومحكوم عليها بالفناء. فكثير من الأنواع تعود إلى الاستنساخ، ولكن لا تكاد تصل إلى سن ناضجة في فترة حياتها كنوع حي؛ إذ تموت دون سبب واضح. ولا يعرف سوى عدد قليل من المستنسخات القديمة، وهي أنواع نشأت منذ عشرات الملايين من السنين وتمخضت عنها مجموعات كبيرة من الأنواع ذات الصلة. والأنواع التي فعلت هذا، مثل حيوانات مجهرية تُسمَّى الدوارات العَلَقيَّة، صارت مشهورة بيولوجيًّا بوصفها استثناءات غير جنسية في عالم مغرم بالجنس، وكأنها رهبان يمرون بحي للبغاء مرور الكرام.

وإذا كان التكاثر الجنسي حمقًا وظيفيًّا وسخافة وجودية، فإن الحقيقة بالرغم من كل ما قلنا سابقًا أن عدم اللجوء للتكاثر الجنسي يجعل الأمور تزداد سوءًا؛ لأن هذا يؤدي في معظم الحالات إلى الفناء والانقراض، وهذا في حد ذاته سخافة لا وجودية. ومن ثم، فلا بد أن تكون هناك مميزات كبيرة للتكاثر الجنسي، مميزات تتغلب على حماقة الإتيان به. والعجيب أن ميزاته يصعب تقديرها وأنها جعلت نشوء التكاثر الجنسي وتطوره أكبر المشكلات التطورية خلال جزء كبير من القرن العشرين. وربما كان الأمر أنه دون التكاثر الجنسي ليس من الممكن أن تُوجَد الصور الكبيرة المعقدة من الحياة على الإطلاق؛ فبغير التكاثر الجنسي نكون جميعًا عرضة للانقراض على مدى أجيال معدودة، وأن نبلى مثل كروموسوم Y الضعيف. وعلى أي حال، فإن التكاثر الجنسي يصنع فارقًا بين كوكب صامت منكفئ على ذاته، مليء بكائنات قاسية جافَّة تتضاعف ذاتيًّا (وهذا يذكرني بقول الملاح العجوز في قصيدة كولريدج الشهيرة «ألف ألف شيء زلق») وبين تفجر السعادة والروعة من حولنا. فالعالم دون تكاثر جنسي عالم محروم من أغنيات الشباب والفتيات، وكذلك الطيور المغردة وحتى الضفادع، ومحروم من ألوان الأزهار الرائعة وتحديات المصارعين وقصائد الشعر والحب والنشوة والطرب. إنه عالم لا يثير أدنى اهتمام. إن التكاثر الجنسي بالتأكيد يقف شامخًا بوصفه واحدًا من أعظم مخترعات الحياة، ولكن لماذا نشأ هذا النوع من التكاثر؟ وكيف؟

كان داروين من أوائل مَن تأمَّلوا فوائد الجنس، وكان براجماتيًّا كما هو العهد به دائمًا. فقد رأى الفائدة الرئيسية للتكاثر الجنسي باعتباره نشاطًا تهجينيًّا تكون فيه ذرية

أبوين لا قرابة بينهما أصلًا أقوى وأصح وأنسب للحياة وأقل عرضة لمعاناة أمراض وراثية — مثل الهيموفيليا أو مرض تاي-ساكس — مما لو كان بين الأبوين صلة قرابة. الأمثلة كثيرة، وما على المرء سوى أن ينظر إلى الملكيات الأوروبية القديمة والمنتمين إليها مثل آل هابسبورج ليجد أناسًا مرضى ومعتوهين ومجانين، ويدرك الآثار الضارة للإسراف في زواج الأقارب. والجنس بالنسبة لداروين كان كله يعني تزاوج الأباعد وليس الأقارب، وإن كان هذا لم يمنعه من أن يتزوج ابنة عمه الأولى «رمز الفضيلة» إيما ويدجوود، التي أنجب منها عشرة أطفال.

لكلام داروين فضيلتان رائعتان، ولكن يعيبه جهله التام بالجينات. والفضيلتان الرائعتان هما أن النشاط التهجيني يكون مفيدًا بصفة مباشرة وأن الفوائد تتركز على المستوى الفردي؛ فتزاوج الأباعد يكون أكثر قابلية لإنتاج أطفال أصحاء، فلا يموتون في طفولتهم، ومن ثم يبقى عدد أكبر من الجينات إلى الجيل التالي. وهو تفسير دارويني حسن له أهمية أوسع سوف نعود إليه فيما بعد. (الانتقاء الطبيعي يعمل هنا على مستوى الأفراد وليست المجموعات الكبيرة.) المشكلة أن هذا يُعَدُّ بحق تفسيرًا لتزاوج الأباعد وليس للجنس. ومن ثم فإنها ليست حتى نصف القصة.

توجَّبَ على الناس الانتظار عدة عقود حتى يصلوا إلى الفهم السليم لآليات الجنس، حينما أُعِيدَ اكتشاف الملاحظات المشهورة للراهب النمساوي جريجور مندل عن خصائص نبات البازلاء في مستهل القرن العشرين. ويجب أن أعترف بأنني حينما كنت طالبًا بالمدرسة كنت دائمًا ما أجد قوانين مندل فجَّةً لدرجة الغموض، وهذا الأمر أتذكره الآن مصحوبًا بإحساس طفيف بالخجل. وحتى في هذه الحالة، أظن أن من الأسهل علينا أن نفهم أوليات علم الجينات إذا أغفلنا قوانين مندل كلية؛ فلقد تَمَّ شرحها بغير معرفة حقيقية لتركيبة الجينات والكروموسومات. دَعْنا ندخل مباشرة إلى التفكير في الكروموسومات باعتبارها أشرطة من الجينات، وحينئذٍ سنرى بوضوح ما يحدث في الجنس، ولماذا يُعتبَر تفسير داروين قاصرًا.

إن الخطوة الأولى في التكاثر الجنسي هي اندماج خليتين جنسيتين — الحيوان المنوي والبويضة — كما رأينا سابقًا. وكلٌّ منهما يأتي لعملية الاندماج بمجموعة واحدة من الكروموسومات؛ مما يعطي البويضة المخصبة مجموعتين كاملتين. ومن النادر أن تكون النسختان متطابقتين تمامًا، ويمكن أن تخفي النسخة الجيدة آثار النسخة المعيبة. هذا هو أساس النشاط التهجيني؛ فتزاوج الأقارب يرفع اللثام عن أمراض مخفية؛ لأنك تكون

أكثر عرضة لوراثة نسختين «معيبتين» من نفس الجين إذا كان والداك قريبين، ولكن هذا لا يُعتبَر في الحقيقة عيبًا لزواج الأقارب وليس ميزة للتكاثر الجنسي. ولكن ميزة النشاط التهجيني تكمن في الحصول على نسختين مختلفتين قليلًا من كل كروموسوم بحيث يمكن أن «تغطِّي» كلٌّ منهما الأخرى، إلا أن هذا ينطبق على المستنسخات التي تكون لديها نسختان مختلفتان من كل كروموسوم بالقَدْر الذي يحدث للكائنات الجنسية. وهكذا، فإن النشاط التهجيني تأتي فائدته من الحصول على مجموعتين مختلفتين من الكروموسومات، وليس من التكاثر الجنسي في حد ذاته.

أما الخطوة الثانية — التي هي تجديد الخلايا الجنسية، وبكلٍّ منها نسخة واحدة من كل جين — فهي التي تُعتبَر مفتاح التكاثر الجنسي، والأكثر صعوبة في التفسير. تُعرَف هذه العملية باسم «الانقسام الاختزالي»، الذي يبدو من الظاهر رائعًا ومحيرًا في الوقت نفسه. فهو رائع؛ لأن الكروموسومات ترقص جذلًا حينما تجد شركاءها، وتحتضنها بقوة لفترة ما، ثم تنطلق مهتاجة نحو القطبين المتقابلين من الخلية؛ لكي تؤدي رقصتها بمثل هذا الجمال والإتقان، لدرجة أن رواد العمل المجهري كان من الصعب عليهم أن يكتموا شعورهم بالذهول وهم يعدُّون أصباغهم المجهرية، المرة تلو الأخرى ليصبغوا الكروموسومات الراقصة بها، ويحملقون فيها مشدوهين وكأنها صور فوتوغرافية قديمة الشكل لفرقة رقص أكروباتي في ذروة نشاطها. والانقسام الاختزالي مُحيِّر؛ لأن خطوات الرقص فيه تكون أكثر تعقيدًا مما كان يتوقعه أي شخص من تلك الأم الرءوم الأكثر عطاء بين واضعي الألحان؛ أمُّنا الطبيعة.

والانقسام الاختزالي يبدأ بخلية لديها نسختان من كل كروموسوم، وفي النهاية تخصص نسخة واحدة لكل خلية جنسية. وهذا أمر منطقي؛ فإذا كان التكاثر الجنسي يعمل على دمج خليتين معًا لإنتاج فرد جديد لديه مجموعتان من الكروموسومات فمن الأسهل كثيرًا لو حصلت الخليتان الجنسيتان على مجموعة لكلٍّ منهما. وما يثير التعجب أن الانقسام الاختزالي يبدأ بمضاعفة جميع الكروموسومات لإنتاج أربع مجموعات لكلٍّ من الخليتين. وهذه يحدث بينها حينئذٍ خلط وملاءمة — والمصطلح التقني هو أنها «تتأشب» أي يُعاد تجميعها — لإنتاج أربعة كروموسومات جديدة تمامًا، وكل كروموسوم منها يأخذ قطعة من هنا وقطعة من هناك، وهذا التأشيب هو اللب الحقيقي للجنس؛ ومعناه أن الجين الذي جاء من أبيك من قبل يجد نفسه الآن مستقرًّا على نفس الكروموسوم الذي يُوجَد عليه جين قادم من أمك. وقد يتم تكرار هذا العمل البارع عدة

مرات على كل كروموسوم؛ لإعطاء تسلسل من الجينات التي تكون بالترتيب التالي، على سبيل المثال: أبوي – أبوي – أمي – أمي – أمي – أبوي – أبوي. وتصير الكروموسومات المتكونة حديثًا الآن فريدة في كيانها؛ فهي لا تختلف بعضها عن بعض فحسب، بل تختلف أيضًا — بصفة مؤكدة تقريبًا — عن أي كروموسوم آخر كان موجودًا من قبل (إذ تكون عمليات التحويل عشوائية، وتتم عادة في أماكن مختلفة). وفي النهاية تنقسم الخلية إلى نصفين، وتنقسم الخليتان الوليدتان مرة أخرى لإنتاج «علَقة» مكوَّنة من أربع خلايا «حفيدة»، كلٌّ منها مُزوَّد بمجموعة واحدة من الكروموسومات الفريدة؛ وهذا هو الجنس.

من الواضح إذن أنَّ ما يفعله التكاثر الجنسي هو خلط الجينات لصياغة تراكيب جديدة، وهي توليفات ربما لم تُوجَد من قبل قط. وهو يفعل هذا بطريقة منظمة عَبْرَ الجينوم بكامله، وهذا يشبه خلط رزمة من أوراق اللعب مع تفكيك المجموعات السابقة للتأكد من حصول جميع اللاعبين على نصيب عادل إحصائيًّا من تلك الأوراق. والسؤال هو: لماذا؟

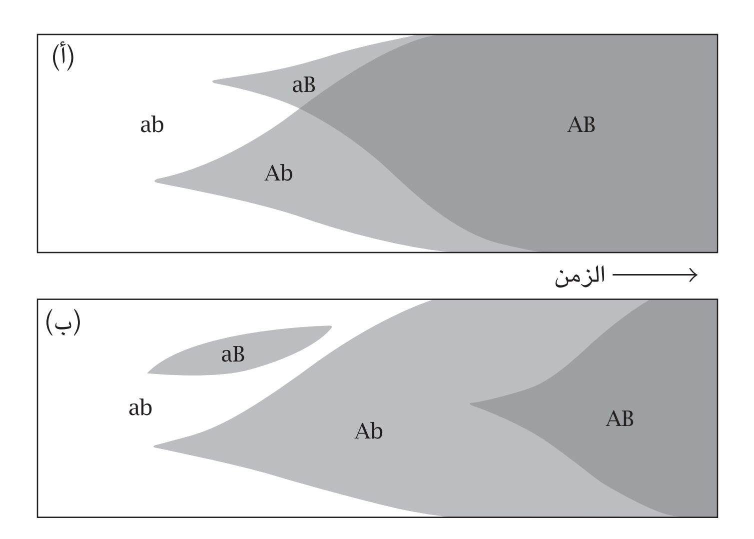
الإجابة التي تبدو معقولة بالبديهة لمعظم علماء الأحياء، حتى اليوم، تعود إلى أوجست فايسمان، المفكر الألماني المبدع وخليفة داروين، الذي افترض في عام ١٩٠٤ أن التكاثر الجنسي يُولِّد تباينًا أكبر لكي يؤدي الانتقاء الطبيعي عمله عليه. كانت إجابته مختلفة جدًّا عن إجابة داروين؛ إذ افترضت أن فائدة التكاثر الجنسي ليست للفرد ولكن لمجموع السكان. وقال فايسمان إن التكاثر الجنسي يُحتمَل أن ينتج توليفات «جيدة» أو «معيبة» من الجينات بنفس الدرجة؛ فبينما قد تكون التوليفات الجيدة مفيدة بشكل مباشر لحاملها، فإن التوليفات المعيبة تكون ضارة بشكل مباشر أيضًا. وهذا يعني أنه لا تُوجَد ميزة خالصة ولا عيب خالص في التكاثر الجنسي بالنسبة للأفراد من أي جيل. ومع هذا، فإن المجتمع ككلٍّ يستفيد منه. وكان هذا ما افترضه فايسمان على أساس أن التوليفات الضارة يتم التخلص منها بفعل الانتقاء الطبيعي، تاركًا في نهاية الأمر (بعد أجيال كثيرة) التوليفات الجيدة في الأغلب الأعم.

بطبيعة الحال، فإن التكاثر الجنسي في حد ذاته لا يدخل أي تنويع في المجموعة السكانية. فدون حدوث طفرات، لا يفعل التكاثر الجنسي سوى خلط الجينات الموجودة بالفعل، مزيلًا الجينات المعيبة من طريقه، وبهذه الطريقة فإنه يُقَيِّد التنويع. ولكن إذا

أُضِيفَ القليل المتناثر من الطفرات الجديدة إلى المعادلة، كما فعل عالم الوراثة الإحصائية الكبير رونالد فيشر في عام ١٩٣٠، فإن ميزات التكاثر الجنسي تزداد حدة ووضوحًا. ونظرًا لأن الطفرات تُعتبَر أحداثًا نادرة، فقد افترض فيشر أن الطفرات المختلفة يُحتمَل أن تحدث بدرجة أكبر في أشخاص مختلفين. وبنفس الطريقة، يكون من المحتمل بدرجة أكبر أن يضرب البرق شخصين مختلفين بدلًا من أن يضرب شخصًا واحدًا مرتين (وإن كان كلاهما — أي الطفرات والبرق — أحيانًا ما يضربان نفس الشخص مرتين).

ولتوضيح وجهة نظر فيشر، دَعْنا نفترض حدوث طفرتين مفيدتين في مجتمع يتكاثر بالاستنساخ. فكيف تنتشر الطفرتان؟ الإجابة هي أنه لا يمكن أن ينتشر أيٌّ منهما إلا على حساب الأخرى، أو على حساب أشخاص تنقصهم الطفرات (انظر الشكل ٥-١). فإذا كانت كلتا الطفرتين مفيدتين بنفس الدرجة، فقد ينتهي الأمر بالمجتمع إلى انقسامه مناصفةً بينهما. ومن المهم أن نؤكد أن لا أحد يمكنه الإفادة من كلا الطفرتين دفعة واحدة ما لم تتكرر الطفرة الثانية في شخص يستفيد بالفعل من الأولى؛ أي إذا ضرب البرق نفس الشخص مرتين! ويعتمد معدل حدوث هذا بدرجة كبيرة أو قليلة على عوامل؛ مثل: معدل التطافر، وحجم المجتمع. ولكن بصفة عامة لا تحدث الطفرات المفيدة إلا نادرًا في مجتمعات تتكاثر بطريقة استنساخية صارمة.[٤] وعلى النقيض من هذا، يستطيع التكاثر الجنسي أن يأتي بالطفرتين الاثنتين معًا في لحظة واحدة من التسامي والتعالي. ومن ثم، فإن فائدة التكاثر الجنسي، كما قال فيشر، هي إمكان الإتيان بالطفرات الجديدة معًا في نفس الشخص بصفة تكاد تكون فورية، وهو ما يمنح الانتقاء الطبيعي فرصة اختبار صلاحية الطفرتين معًا. وإذا ثبتت بالفعل صلاحية الطفرتين الجديدتين، فيساعد التكاثر الجنسي على نشرهما في سلاسة عَبْر المجتمع كله، وهو ما يجعل الكائنات أكثر تأقلمًا ويُسْرع من عملية التطور (انظر الشكل ٥-١).

وفيما بعد جاء عالم الوراثة الأمريكي هيرمان مولر، الذي حصل على جائزة نوبل في الفسيولوجيا أو الطب عام ١٩٤٦ عن اكتشافه أن الأشعة السينية تُسبِّب تطافر الجينات؛ ليعمل على تطوير افتراض فيشر ليشمل الطفرات الضارة. وقد عرف مولر — من خلال تجاربه على ذباب الفاكهة وإحداثه، شخصيًّا، آلافَ الطفرات فيها — أكثر من أي شخص آخر في عصره أن أغلب الطفرات الجديدة تكون ضارة. وقد واجه مولر سؤالًا فلسفيًّا أعمق مفاده: كيف يمكن أن يخلص مجتمع استنساخي نفسه من تلك الطفرات الضارة؟ وللإجابة عن هذا السؤال، قال مولر: تخيَّلْ أن كل الذباب تقريبًا



شكل ٥-١: انتشار الطفرات المفيدة الجديدة في الكائنات الجنسية (أعلى) مقابل الكائنات اللاجنسية (أسفل). في حالة التكاثر الجنسي، نجد أن الطفرات المفيدة التي تُغَيِّر الجين a إلى A، والجين b إلى B، سريعًا ما تتَّحِد مرة أخرى لتعطي النمط الجيني الأفضل AB. وبغير الجنس، لا يمكن أن ينتشر الجين A إلا على حساب الجين B، والعكس صحيح. ومن ثم، لا يمكن أن يتكوَّن النمط الجيني الأفضل AB إلا حينما تتكرر الطفرة B في مجتمع Ab من الكائنات.

حدث فيه طفرة واحدة أو اثنتان، تاركًا عددًا قليلًا فقط من الأفراد «النظيفين» جينيًّا. فماذا سيحدث بعد ذلك؟ في مجتمع استنساخي صغير بعض الشيء، لا يكون ثمة مفر من حدوث انخفاض لا رجعة فيه في الصلاحية يتم تشبيهه بالسقاطة. المشكلة هي أن احتمالية التكاثر لا تعتمد على الكفاءة الجينية فحسب، بل تعتمد أيضًا على دور الحظ، وعلى أن تكون في المكان الصحيح، في الوقت الصحيح. ولتتصوَّرْ ذبابتين، إحداهما لديها طفرتان والأخرى بدون طفرات. ثم يحدث أن تجد الذبابةُ الطافرةُ نَفْسَها وسط طعام وفير، بينما تتضوَّر الذبابة الأخرى «النظيفة» جوعًا؛ فمع أن الذبابة الطافرة أقل كفاءة، فإنها وحدها هي التي ستعيش حتى تنتقل جيناتها إلى ذريتها. والآن تخيَّلْ أن الذبابة الجائعة كانت آخر ذبابة من نوعها، أي إنها الذبابة غير الطافرة الوحيدة المتبقية؛

فعلى هذا يكون الآن لدى كل ذبابة أخرى تعيش ضمن مجتمع الذباب طفرة واحد على الأقل. فما لم يحدث لإحدى الذبابات الطافرة تحوُّل رجوعيٌّ، وهو حدث شديد الندرة، فإن مجتمع الذباب ككلٍّ سيصير الآن أقل كفاءة بمقدار درجة عمَّا كان في السابق. ويمكن تكرار نفس السيناريو المرة تلو الأخرى، وكل مرة تقل الكفاءة وكأنها تكتكة في السقاطة. وفي نهاية الأمر يحدث تدهور شديد لمجتمع الذباب بكامله لدرجة الانقراض، وهو تطوُّر يُعرَف الآن باسم «سقاطة مولر».

تعتمد «سقاطة مولر» على الحظ؛ فإذا كان مجتمع السكان كبيرًا يَقِلُّ دور الحظ، وتكون الاحتمالية الإحصائية أن يبقى أنسب الأفراد أحياء. أي إنه في المجتمع كبير العدد يُلغى دور الحظ الكبير، وإذا كانت سرعة التكاثر أكبر من المعدل الذي يحدث به تراكم الطفرات الجديدة، فإن المجتمع ككلٍّ يكون آمنًا من تأثير السقاطة. من ناحية أخرى، إذا كان مجتمع السكان صغيرًا أو إذا كان معدل التطافر عاليًا فإن تأثير السقاطة يعمل. وفي هذه الظروف يبدأ المجتمع المستنسخ يذوي ويضمحل، وتتراكم فيه الطفرات بشكل نهائي لا رجعة فيه.

التكاثر الجنسي هو طوق النجاة؛ لأنه يستطيع أن يُعِيد تشكيل الأفراد غير المعيبين بأن يأتي بجينات غير طافرة ويضمها في نفس الفرد. وبنفس الطريقة إذا تعطَّلَتْ سيارتان مثلًا — ولْنَقُل إن في إحداهما صندوق تروس معيب، وفي الأخرى مُحَرِّك تالف، وباستخدام تشبيه جون ماينارد سميث — فإن التكاثر الجنسي يشبه ميكانيكيًّا يقوم بتركيب سيارة صالحة للاستخدام بتجميع الأجزاء العاملة من السيارتين. ولكن التكاثر الجنسي يختلف عن الميكانيكي الذكي في كونه يقع في مشكلة تجميع الأجزاء التالفة أيضًا لينتج حينئذٍ كومة معطَّلة من الخردة. وبفعل التعادل، تُلغى الفوائد الفردية للتكاثر الجنسي على مَرِّ الزمان بفعل ما يحدث من ضرر فردي في المقابل.

إلا أن هناك مهربًا واحدًا فقط من هذا المصير التعادلي للجنس، ورَدَ ضمن افتراض قدَّمَه في عام ١٩٨٣ عالِمُ الوراثة التطورية الروسي الداهية أليكسي كوندراشوف، الذي صار الآن أستاذًا بجامعة ميشيجان الأمريكية. حصل كوندراشوف على درجته العلمية في علم الحيوان في العاصمة الروسية موسكو قبل أن يصبح باحثًا نظريًّا في مركز بوشينو للأبحاث، وكانت قدرات الكمبيوتر هي التي مكَّنَتْه من التوصل إلى نتائجه العلمية المذهلة عن التكاثر الجنسي. تتضمن نظريتُه افتراضين جريئين، لا يزالان يثيران جدلًا كبيرًا بين المهتمين بالنشوء والتطور. ويشير أولهما إلى أن معدل التطافر أعلى مما كان يظن معظم

الناس؛ لكي تؤدي نظرية كوندراشوف مهمتها، يجب أن تحدث واحدة أو أكثر من الطفرات الضارة في كل شخص من كل جيل. والافتراض الثاني هو أن أغلب الكائنات تكون مقاومة — تقريبًا — لتأثيرات الطفرات المفردة؛ فإننا لا نبدأ فعلًا في التدهور في مستوى الكفاءة واللياقة إلا حينما نَرِث عددًا كبيرًا من الطفرات في نفس الوقت. وقد يحدث هذا، على سبيل المثال، إذا كان الجسم يتمتَّع بفائض ما. ومثلما يمكن أن يحدث للبعض منا إذا فَقَدَ إحدى كليتيه، أو إحدى رئتيه، أو إحدى عينيه (إذ يستمر العضو السليم في أداء وظيفته لصالح الجسم)، فعلى مستوى الجينات كذلك تُوجَد درجة من التراكب في الوظيفة؛ إذ يمكن أن يؤدِّي أكثر من جين واحد نفس الشيء، وهو ما يُخفِّف العبء والضرر عن الجسم ككلٍّ ضد التلف الشديد. وإذا كان من الصحيح حقًّا أن الجينات يمكن أن يؤدِّي بعضها مهام بعضٍ بهذه الطريقة، فإن حدوث طفرة واحدة لن يكون كارثيًّا، وبهذا يمكن أن تكون نظرية كوندراشوف فعَّالة.

كيف يفيدنا هذان الافتراضان؟ أما عن الافتراض الأول — وهو ارتفاع معدل التطافر — فيعني أن المجتمعات المستنسخة لن تكون أبدًا في أمان من سقاطة مولر، بل ستتعرض لا محالة للبلى والانحلال، وستعاني في نهاية الأمر من حالة «انفجار في الطفرات». وأما الافتراض الثاني فأبرع من ذلك؛ إذ يعني أن التكاثر الجنسي بإمكانه أن يتخلَّص من أكثر من طفرة واحدة في الحال. وقد عَقَد مارك ريدلي قياسًا رائعًا، شبَّهَ فيها الاستنساخ والتكاثر الجنسي بالعهدين القديم والجديد من الإنجيل، على الترتيب. إذ قال إن الطفرات هي مثل الخطيئة؛ فإذا وصل معدل التطافر إلى طفرة واحدة لكل جيل (وهذا يقابل القول إن كل ابن آدم خطاء)؛ فحينئذٍ يكون السبيل الوحيد للخلاص من الخطيئة في مجتمع استنساخي هو أن تمحو المجتمع كله تمامًا بأن تغرقه بالطوفان، أو تحرقه بالنار والكبريت، أو يتفشَّى فيه الطاعون. وعلى العكس من هذا، يمكن أن تكدِّس الكائنات الجنسية عددًا من الطفرات بدون أضرار (وصولًا إلى نقطة اللاعودة)؛ ومن ثم فإن التكاثر الجنسي لديه القدرة على تجميع عدد كبير من الطفرات في كلٍّ من الأبوين السليمين، وأن يركزها كلها في طفل واحد. وهذا ما يمكن تسميته طريقة العهد الجديد؛ إذ يقول ريدلي إن المسيح تعذَّب وتعرَّض للقتل؛ لأنه كان يجمع أوزار البشر، وكذلك التكاثر الجنسي؛ إذ يمكن أن يضم الطفرات المتراكمة لمجتمعٍ ما معًا في كبش فداء واحد، ثم يذبحه.

وقد استنتج كوندراشوف أن التكاثر الجنسي وحده يمكنه أن يمنع انفجار الطفرات في الكائنات المعقَّدة الكبيرة. والنتيجة الطبيعية الحتمية هي أن الحياة المعقَّدة لا تكون ممكنة بغير التكاثر الجنسي، وهو استنتاج يثير الإلهام في النفوس، ولكن لا يمكن قبوله من جميع الأطراف. فما زالت المجادلات تنشب عن كلا افتراضَيْ كوندراشوف، وليس من السهل قياس معدل التطافر ولا التفاعلات التي تحدث بين الطفرات المختلفة بشكل مباشر. وإن كان هناك أي إجماع فهو على أن النظرية قد تكون صحيحة في قليل من الأحوال، وأن الافتراضين كثيرًا ما يكونان خطأً بدرجة تجعلهما لا يُبرِّران ذلك الكمَّ الهائلَ من التكاثر الجنسي الذي يجري في العالم. كما لا تُفَسِّر نظرية كوندراشوف منشأ التكاثر الجنسي لدى الكائنات وحيدة الخلية البسيطة التي لا تقلق بشأن كونها كبيرة أو مُعقَّدة.

وهكذا، فإن التكاثر الجنسي ينفع المجتمعات بأن يأتي بتجميعات مفيدة من الجينات، وبأن يتخلص من التجميعات غير المفيدة. وعلى مدى النصف الأول من القرن العشرين كانت تلك القضية تُعتبَر محسومة تقريبًا، وإن كان السير رونالد فيشر قد أعرب عن بعض التحفظات بخصوص نظريته هو شخصيًّا. وبصفة عامة، كان فيشر — مثل داروين — يعتقد أن الانتقاء الطبيعي يؤثِّر على الأفراد بوصفهم أفرادًا، ولا يعمل لصالح النوع ككلٍّ. إلا أنه وجد نفسه مجبرًا على أن يستثني عملية إعادة تجميع الجينات (التأشيب) التي يمكن تفسيرها على أنها نشأت لصالح النوع وليس لصالح الفرد. وصحيح أن نظرية كوندراشوف هي في صالح غالبية الأفراد، وإن كانت تضحِّي بأحد الأفراد بين الحين والحين، ولكن حتى في هذه الحالة فإن الفوائد المباشرة للتكاثر الجنسي لا يمكن الشعور بها إلا بعد أجيال كثيرة. كما أن هذه الفوائد لا تمس الأفراد بالفعل، بالمعنى التقليدي على الأقل.

كان الفتيل الذي أشعله فيشر بطيء الاشتعال، ولكن القنبلة الموقوتة انفجرت في النهاية في منتصف عقد الستينيات، حين بدأ التطوريون التشبث بأفكار الجينات الأنانية ومفارقة السلوك الإيثاري. ظهرت بعض الأسماء الكبيرة في نظرية التطور؛ مثل: جورج سي ويليامز، وجون ماينارد سميث، وبيل هاملتون، وروبرت تريفرز، وجراهام بل، وريتشارد دوكينز؛ ليضطلعوا بالمشكلة. ولقد صار واضحًا أن السلوك الإيثاري يندر في عالم الأحياء؛ فنحن حقًّا — كما قال دوكينز — دمى عمياء لجينات أنانية لا تعمل في الغالب إلا لمصالحها الشخصية. وقد كان السؤال، من وجهة النظر الأنانية تلك هو: لماذا

لا يفوز المحتالون على الدوام؟ ولماذا يضحِّي أي فرد بأفضل مصالحه الآن (وهو التكاثر بالاستنساخ) من أجل فائدة (الصحة الجينية) لا يمكن أن يكتسبها نوعه إلا في مرحلة بعيدة ما في المستقبل؟ فبالرغم من كل ما نتمتع به من بصائر، فإننا بوصفنا بشرًا نجد صعوبة في العمل من أجل مصالح ذرياتنا في المستقبل القريب، ولتفكر فيما يحدث من تدمير الغابات، وارتفاع حرارة الأرض، والانفجار السكاني. فكيف إذن يمكن أن يعلي التطور الأناني الأعمى (حسبما يقولون) فوائد التكاثر الجنسي طويلة الأمد للناس فوق مستوى تكاليفه وأعبائه المضاعفة قصيرة الأمد، بكل عيوبها الواضحة الحاضرة؟

تُوجَد إجابة واحدة ممكنة، هي أن استمرار وجود التكاثر الجنسي إنما راجع إلى صعوبة أن يختفي بفعل عملية تطوُّر عكسية. وإذا كان الأمر كذلك فإن الكلفة قصيرة الأمد للتكاثر الجنسي هي أمر غير قابل للمناقشة. تتسم هذه الحجة بقدر من الوجاهة. كما ذكرت سابقًا فإن جميع الأنواع المستنسخة نشأت مؤخرًا، أي منذ آلاف، وليس ملايين السنين. وهذا هو بعينه نوع النمط الذي نتوقعه إذا كانت الأنواع المستنسخة تنشأ بصفة نادرة، ثم تستمر فترة وتضمحل بعدها باضطراد إلى أن تنقرض على مدى آلاف السنين. وبالرغم من «ازدهار» الأنواع اللاجنسية أحيانًا فإن التكاثر اللاجنسي لم يحل محل التكاثر الجنسي بالكامل إلا نادرًا؛ لأننا في أي لحظة بعينها لا نجد إلا القليل من الأنواع اللاجنسية حولنا. وفي الواقع إن هناك بعض الأسباب القوية التي جعلت من الصعب على الكائنات الجنسية أن تنتقل إلى التكاثر بالاستنساخ. ففي الثدييات على سبيل المثال، تُوجَد ظاهرة تُعرَف باسم الدمغ (يتم بمقتضاها تعطيل بعض الجينات الأمومية أو الأبوية) وتعني أن أي ذرية يجب أن ترث الجينات من كلا الأبوين، وإلا فلن تكون قابلة للحياة. ويبدو من العسير من الناحية التقنية التخلي عن ذلك الاعتماد على وجود جنسين؛ فلم يحدث أن تخلَّى حيوان ثديي عن الاتصال الجنسي. وبالمثل في النباتات الصنوبرية، من الصعب إبطال وجود الجنسين؛ لأن الميتوكوندريا تورث في البويضة، بينما يتم توريث بلاستيدات الكلوروفيل في حبة اللقاح. ولكي تكون الذرية قابلة للحياة، يجب أن ترث كليهما؛ مما يتطلب وجود أبوين. ونؤكد مرة ثانية أن كل النباتات الصنوبرية المعروفة جنسية.

لكن هذه الحجة تتوقف عند هذا الحد. فهناك أسباب عدة تجعلنا نعتقد أن التكاثر الجنسي لا تقتصر فائدته على المجتمع عمومًا، بل يجب أن تكون له منافع مباشرة للفرد أيضًا. فأولًا، هناك عدد كبير من الأنواع — بل أغلب الأنواع إذا وضعنا في اعتبارنا العدد

الهائل من الكائنات وحيدة الخلية — يُعتبَر جنسيًّا «اختياريًّا»؛ بمعنى أنه لا ينخرط في التكاثر الجنسي إلا بين الحين والآخر، بل قد لا يحدث هذا إلا مرة كل ثلاثين جيلًا أو نحو ذلك. وفي الواقع، بعض الأنواع مثل طفيلي الجيارديا لم يحدث مطلقًا أن رُصِد وهو ينخرط في عملية تكاثر جنسي، ولكنه مع ذلك يحتفظ في داخله بكل الجينات اللازمة للانقسام الاختزالي، بما يوحي بأنه ربما يلجأ إلى اختلاس التزاوج حينما يكون بعيدًا عن أعين المراقبين وحسب. وهذا المنطق لا ينطبق على الكائنات وحيدة الخلية العجيبة فقط، بل على بعض الكائنات الكبيرة أيضًا، مثل القواقع والعظايا والحشائش، التي تنتقل من الاستنساخ إلى التكاثر الجنسي حينما تملي عليها الظروف ذلك. ومن الواضح أنها يمكن أن تعود إلى الاستنساخ كلما شاءت، ومن ثم لا يُعتبَر حاجز «الصدفة» هو الجواب.

ويُوجَد افتراض مماثل ينطبق على منشأ عملية التكاثر الجنسي. فحينما تمَّ «اختراع» التكاثر الجنسي للمرة الأولى من قِبَل أول حقيقيات النوى (وسنذكر المزيد عن هذا فيما بعد)، فلا بد أن كان ثمة عدد قليل من الخلايا التي تتكاثر جنسيًّا ضمن مجتمع أكبر من الخلايا التي تتكاثر لا جنسيًّا. ولكي تنتشر في أنحاء ذلك المجتمع (كما لا بد أن يكون قد حدث؛ لأن جميع حقيقيات النوى تنحدر من سلف كان جنسيًّا بالفعل) لا بد أن تكون عملية التكاثر الجنسي نفسها قد أعطت ميزة لذرية الخلايا المتكاثرة جنسيًّا. وبتعبير آخر نقول إن التكاثر الجنسي لا بد أن يكون قد انتشر أصلًا لأنه نفع أفرادًا ضمن مجتمع ما وليس المجتمع ككلٍّ بصفة عمومية.

هذا الإدراك الواضح — بأن التكاثر الجنسي لا بد أن ينفع الأفراد، بالرغم من كلفته المضاعفة — ورد على لسان جورج سي ويليامز في عام ١٩٦٦. وقد بدا وقتها كأنَّ المشكلة قد حُلَّتْ، لكنها الآن برزت مجددًا في أعقد صورة. فلكي ينتشر التكاثر الجنسي في مجتمع لا جنسي، كان حتمًا على الأفراد الجنسيين أن ينجبوا أكثر من ضعف عدد الذرية الباقية على قيد الحياة من كل جيل. ومع ذلك، فقد كانت آليات التكاثر الجنسي العادلة مفهومة جيدًا؛ فمقابل كل فائزٍ هناك خاسرٌ، ومقابل كل مجموعة جيدة من الجينات هناك واحدة معيبة. وقد تحتَّمَ أن يكون التفسير دقيقًا وهائل الأثر في الآن عينه، بحيث يكون ماثلًا أمامنا ومع ذلك خفيًّا علينا فلا نراه. ولا غرو أنَّ جذب هذا اللغز بعضًا من أرقى العقول في ميدان علم الأحياء.

نقل ويليامز بؤرة التركيز من الجينات إلى البيئة، أو تحديدًا إلى علم البيئة. وطرح تساؤلًا: لماذا يكون من الخير أن تكون مختلفًا عن والديك؟ وأجاب قائلًا: قد يكون

هذا مهمًّا إذا كانت البيئة تتغيَّر، أو إذا كانت الكائنات تغزو منطقة جديدة، وتوسَّعَ نطاق نشاطها؛ بالانتشار أو الهجرة. ومن ثم خلص ويليامز إلى أن التكاثر بالاستنساخ يشبه شراء مائة تذكرة يانصيب، كلها بنفس الرقم، لكن من الأفضل أن تشتري خمسين تذكرة، كلٌّ منها برقم مختلف، وهذا هو الحل الذي يُقدِّمه الجنس.

تبدو الفكرة معقولة، وبالتأكيد هناك حالات تكون فيها صحيحة، ولكنها كانت الأولى من بين فرضيات بارعة كثيرة تَمَّ وزنها في مقابل المعطيات وتبيَّن ضعفها. فإذا كان التكاثر الجنسي هو الحل لمشكلة تقلُّب البيئة، فلا بد أن نجد المزيد من الممارسة الجنسية في المناطق المرتفعة أو البعيدة عن خط الاستواء المُعَرَّضة للأحوال المتقلِّبة، أو في مجاري المياه العذبة التي تتعرَّض للفيضانات أو للجفاف بشكل متناوب. ولكن كقاعدة عامة فإننا لا نجد هذا يحدث، بل إن هناك المزيد من التكاثر الجنسي في البيئات المستقرة المكتظة بالسكان، مثل ضفاف البحيرات أو البحار والمناطق المدارية. وبصفة عامة، إذا تغيَّرَت البيئة سلبيًّا فإن النباتات والحيوانات تتتبع الأحوال الأفضل لها؛ بحيث تنتقل شمالًا — على سبيل المثال — بعد ذوبان الثلوج في الشمال. ومن النادر أن تتغير البيئة بسرعة لدرجة تجعل الذرية تحتاج إلى أن تختلف في كل جيل. من المفترض أن تكون الممارسة الجنسية المتباعدة أفضل؛ فالنوع الذي يتكاثر بالاستنساخ أغلب الوقت، لكنه يتزاوج مرة كل ثلاثين جيلًا على سبيل المثال، يستطيع أن يتغلب على الكلفة المضاعفة للتكاثر الجنسي دون أن يفقد فائدة التأشيب. ولكن هذا ما لا نجده في الواقع في أغلب الأحوال، على الأقل بالنسبة للكائنات الكبيرة كالنباتات والحيوانات.

كما أخفقت أفكار بيئية أخرى، مثل التنافس على الأرض، في أن تجد دعمًا من المعطيات المتاحة. ولكن على نحو مفاجئ ظهرت فكرة في هذا الاتجاه الذي هجره العلماء، وهي فكرة «الملكة الحمراء». هذه الملكة، إذا لم تكن قد صادفتها من قبل، هي شخصية سريالية مأخوذة من القصة العبثية التي ألَّفَها لويس كارول بعنوان «عبر المرآة». فحينما تقابل أليس الملكة، تكون أليس في حالة الجري المحموم، دون أن تصل إلى هدف محدد، فتقول لها الملكة: «توقَّفي وفكِّري فيما أقول؛ مهما جريتِ بأقصى ما تستطيعين، فستبقين في نفس المكان.» وبينما يستخدم علماء الأحياء هذه الفكرة عند حديثهم عن سباق التسلح والتكالب على مناطق النفوذ بين الأنواع المختلفة من الكائنات التي تدور في فَلَك المنافسة الدائمة المستمرة — فهم يتسابقون معًا دائمًا، دون أن يسبق أحدٌ منهم غيرَه إلا لوقت قصير — فإن نفس الفكرة لاقَتْ أكبر صدى لها فيما يختص بنشوء الجنس.[٥]

حظيت نظرية الملكة الحمراء بتأييد قوي في بدايات ثمانينيات القرن الماضي على يد بيل هاملتون، وهو عالم لامع في علم الجينات الرياضية وأحد أنصار المذهب الطبيعي، ويعتبره الكثيرون «أبرز مؤيدي المذهب الدارويني منذ عصر داروين». فبعد أن قَدَّمَ هاملتون سلسلةً من المقالات المهمة في تعضيد النظرية الداروينية (إذ قدَّمَ، على سبيل المثال، نماذجَ لانتقاء الأقرباء لتفسير السلوك الإيثاري) سقط فريسة للطفيليات، ولا سيما طفيل الملاريا الذي غزا جسمه بشراسة في سن ٦٣ عامًا، حينما كان ضمن حملة جريئة في حوض نهر الكونغو بأفريقيا في عام ١٩٩٩؛ إذ كان يبحث عن قرود الشمبانزي المصابة بعدوى فيروس الإيدز، ثم مات في عام ٢٠٠٠. وإثر ذلك نشر أحد زملائه — ويُدعى روبرت تريفرز — نعيًا مؤثرًا في مجلة «نيتشر»، وكتب قائلًا: «إن هاملتون كان عقله أكثر العقول التي صادفتُها في حياتي غموضًا وتعددًا في مستوياتها. فما كان يقوله غالبًا ما يكون له معنيان أو ثلاثة معانٍ، فإذا كان الآخرون يتحدثون ويفكرون بنغمات مفردة، فإنه كان يفكر بنغمات متعددة متآلفة.»

وقبل ظهور هاملتون باهتماماته الحماسية كانت للطفيليات سمعة سيئة، حتى إن عالمًا بريطانيًّا في علم الحيوان كان يعيش في عصر الملكة فيكتوريا وكانت آراؤه ذات تأثير قوي، ويُدعى راي لانكستر، كان يزدري الطفيليات وينبذها باعتبارها نتاجًا حقيرًا للتردي والانحطاط التطوري (وكان يعتقد أن هذا سيكون أيضًا مصير الحضارة الغربية في المستقبل)، واستمرَّتْ آراء لانكستر التشاؤمية تخيِّم بظلالها على علماء الحيوان على مدى قرن كامل بعدها. ونَدُرَ أن يُوجَد باحثون من خارج نطاق علم الطفيليات راغبون في أن يبرزوا ما تتمتع به الطفيليات من قدرات مذهلة على التأقلم؛ إذ يتغير شكلها وطبيعتها من عائل لآخر، وتؤقلم نفسها مع أهدافها بدقة عجيبة، وهي أسس حيَّرَت علماء الطفيليات على مدى عقود عدة. إن الطفيليات بعيدة تمامًا عن فكرة الضعف والتحلل؛ إذ هي من بين أكثر الأنواع المعروفة براعة في التأقلم، بل وأكثر من هذا، فإنها ناجحة بشكل يثير الدهشة؛ فبعض التقديرات تشير إلى أنها تزيد في أعدادها عن الأنواع حرة المعيشة بأربعة أضعاف. وسرعان ما أدرك هاملتون أن التنافس الذي لا يلين بين الطفيليات وعوائلها هو الأرضية التي تجعل التكاثر الجنسي يُقَدِّم مزية عظيمة.

لماذا يكون المرء أحيانًا مختلفًا عن والديه؟ ربما كان السبب هو إصابة الوالدين بالطفيليات بكثافة، وربما كانت إصابتهم تلك طويلة الأمد. وبينما الأشخاص المحظوظون الذين يعيشون في بيئات صحية في أوروبا أو أمريكا الشمالية قد لا يحسون بأضرار

العدوى الشنيعة بالطفيليات وأهوالها، فإن باقي أنحاء العالم ليس في أغلبه محظوظًا مثلهم؛ فهناك أمراض خطرة مثل الملاريا ومرض النوم والعمى النهري تُسبِّبها كائناتٌ طفيليةٌ وتجلب للكثيرين البؤس والشقاء، بل يُوجَد في أنحاء العالم ما لا يقل عن مليارَيْ نسمة مصابين بعدوى الطفيليات بنوع أو بآخر. وإننا بصفة عامة أكثر عرضة لأنْ نَقَع فريسة لهذه الأمراض أكثر من وقوعنا فريسة للحيوانات المفترسة، أو الأحوال الجوية المتطرفة أو المجاعات. وبصفة أكثر عمومية، من الشائع أن تكون الحيوانات والنباتات المدارية عوائل لما يصل إلى عشرين نوعًا مختلفًا من الطفيليات دفعة واحدة.

والتكاثر الجنسي مفيد هنا لأن الطفيليات تتطور بسرعة؛ فأعمارها قصيرة ودورات حياتها سريعة وأعدادها هائلة. فلا تحتاج لوقت طويل حتى تتأقلم مع عوائلها حتى عند أدق المستويات الجزيئية: بروتين لبروتين، وجين لجين. وإخفاقها في هذا الصدد يكلفها حياتها، ونجاحها يعطيها الحرية في النمو والتكاثر. وإذا كان مجتمع العوائل متماثلًا من الناحية الجينية، فسيجد الطفيل الناجح حريته في التفشي في المجتمع بأكمله، وقد يقضي عليه تمامًا. ولكن إذا كانت العوائل متغايرة فيما بينها، فهناك فرصة، بل فرصة قوية، لأن يكون لدى بعض الأفراد منها نمط جيني نادر يمكنه أن يقاوم الطفيل. ويمكن لهؤلاء الأفراد أن يعيشوا بشكل لا بأس به إلى أن يُضطر الطفيل إلى أن يركز اهتمامه في هذا النمط الجيني الجديد وإلا واجه الانقراض هو نفسه. ومن ثم تستمر لعبة القط والفأر، جيلًا بعد جيل، وتدور الأنماط الجينية وتتوالى، ويستمر الجري، ويتواصل السعي، بلا نهاية محدودة ولا وجهة مقصودة؛ تمامًا مثل تلك الملكة الحمراء في قصة لويس كارول العبثية. ومن ثم فإن التكاثر الجنسي موجود ليحدَّ من انتشار الطفيليات.[٦]

أو هكذا تقول النظرية على أي حال. من الحقيقي بالتأكيد أن التكاثر الجنسي يتفشَّى في المناطق المكتظة بالسكان؛ حيث تزدهر الطفيليات، ومن الحقيقي أيضًا بنفس الدرجة أن التكاثر الجنسي يمنح فائدة فورية واضحة لذرية أولئك الناس بصفة فردية تحت هذه الظروف. لكن حتى في هذه الحالة، هناك شكوك عما إذا كان التهديد الذي تفرضه الطفيليات خطيرًا بالفعل لدرجة تكفي لتبرير نشوء التكاثر الجنسي وتطوره وانتشاره على نطاق واسع. وإن نوع دورات النمط الجيني الذي لا يلين، والذي تنبأت به نظرية الملكة الحمراء، لا يمكن اكتشافه بسهولة في الطبيعة، كما أن نماذج الكمبيوتر المصممة لاختبار الظروف التي تعزز التكاثر الجنسي ترسم صورة أكثر محدودية بكثير من التصور الأصلي المتفجر لهاملتون.

وفي عام ١٩٩٤، على سبيل المثال، اعترف كيرتس ليفلي — وهو أحد الرواد الذي تبنَّوْا نظرية الملكة الحمراء — بأن عمليات المحاكاة المعتمدة على الكمبيوتر أظهرت أن الطفيليات لا تعطي ميزة مؤكدة وواضحة للتكاثر الجنسي إلا حينما تكون احتمالات العدوى بالطفيليات مرتفعة (بنسبة أكبر من ٧٠ بالمائة) وتكون أضرار الطفيليات على كفاءة العوائل فادحة (بنسبة نقصان للكفاءة تزيد عن ٨٠ بالمائة). ومع أن هذه الظروف والشروط تنطبق في حالات قليلة، فإن أغلب حالات العدوى بالطفيليات لا تكون بالشدة الكافية لإعطاء التكاثر الجنسي اليد العليا. كما أن حدوث الطفرات يعني أن المستنسخات أيضًا يمكن أن تصير متباينة جينيًّا بمرور الزمن، وتظهر نماذج الكمبيوتر أن المستنسخات المتباينة تميل لأن تصيب نجاحًا أكثر من الكائنات الجنسية. إلا أن عمليات التدقيق البارعة المختلفة تعطي نظرية الملكة الحمراء المزيد من القوة، لكنها ليست قوة كافية. ومع حلول منتصف التسعينيات لم يكن ثمة أحد من أطراف هذه القضية إلا وكان يشعر بشيء من الإحباط، وهو إحباط ناجم عن أنه لا تُوجَد نظرية واحدة استطاعت أن تبرِّر نشوء التكاثر الجنسي واستمراره.

بالطبع ما من شيء يُحَتِّم أن تُفَسِّر نظريةٌ واحدةٌ فقط التكاثرَ الجنسيَّ. فلا تُوجَد نظرية تُقْصِي غَيْرَها من النظريات عن الساحة تمامًا، ومع أن هذا الحل قد يبدو غير منضبط من وجهة النظر الرياضية، فإن الطبيعة يمكنها أن تسير على هذا النحو غير المنضبط كما تشاء. وبدءًا من منتصف التسعينيات بدأ الباحثون في الدمج بين النظريات ليروا ما إذا كان بعضها يدعم بعضًا بطريقة ما. وهذا يحدث بالفعل؛ فمن المهم معرفة النظريات التي قد تتوافق مع نظرية الملكة الحمراء، وهي تتفق مع بعض النظريات بأكثر مما تتفق به مع غيرها. وقد أظهر كيرتس ليفلي أننا إذا استعنَّا بنظريتَيِ الملكة الحمراء وسقاطة مولر معًا، فإن احتمالية نشوء التكاثر الجنسي ترتفع، وهو ما يجعل كلتا النظريتين أكثر قابلية للتطبيق. ولكن حينما عاد الباحثون مجددًا لفحص المعاملات المختلفة، تبيَّنَ أن أحدها خطأ بالتأكيد؛ فقد كان البناء محكمًا من الناحية الرياضية لدرجة لا تُناسِب عالَمَنا الواقعيَّ. ونعني بهذا افتراض أن حجم مجتمع الكائنات لامحدود؛ فأغلب المجتمعات السكانية من الكائنات ليست أبعد ما تكون عن صفة اللامحدودية وحسب، بل إن حتى أوسع المجتمعات السكانية انتشارًا تكون مبنية على أسس جغرافية، ومقسَّمة إلى وحدات محدودة مراعاة للأمان، وتكون معزولة جزئيًّا. وهذا يصنع فارقًا يُثِير الدهشة.

ولعل أكبر مفاجأة هي الشيء الذي تغيَّر بالتحديد. فلقد برزت الأفكار القديمة عن علم جينات السكان التي ترجع إلى فيشر ومولر في الثلاثينيات مجددًا من مرقدها داخل أضابير الكتب؛ لكي تَصِير — في اعتقادي — أكثر النظريات نجاحًا في تفسير انتشار التكاثر الجنسي واستمراره. ومع أن عددًا من الباحثين من عقد الستينيات وما بعده طوَّروا أفكار فيشر — لا سيما ويليام هيل وآلان روبرتسون وجو فلسنشتاين — فإن المعالجات الرياضية الملهمة من جانب نيك بارتون في جامعة إدنبرة، وسارة أوتو في جامعة كولومبيا البريطانية؛ هي التي دفعت الجهودَ قدمًا بالفعل. وعلى مدى العقد الماضي نجح نموذجهما الموضوع في تفسير التكاثر الجنسي سواء فيما يتعلَّق بفائدته للأفراد أو فائدته للمجتمعات. ومما يبعث على السرور أن الإطار الجديد يضمُّ أيضًا نظريات أخرى، بدءًا من يانصيب ويليام وحتى الملكة الحمراء نفسها.

تعتمد الأفكار الجديدة على تفاعل المصادفة والانتقاء في المجتمعات المحدودة. أما في المجتمعات اللامحدودة، إن وُجِدَتْ، فأي شيء يمكن أن يحدث سوف يحدث. فمن المحتم أن تبرز التوليفة المثالية من الجينات، ومن المرجح ألا يستغرق هذا وقتًا طويلًا. ولكن في المجتمعات المحدودة يختلف الموقف كثيرًا؛ ذلك لأنه بدون إعادة تجميع الجينات على الكروموسومات (أي التأشيب) تكون الجينات مرتبطة معًا على الكروموسوم مثل حبات المسبحة على الخيط. ويعتمد مصير الكروموسوم على الخيط الرابط ككلٍّ، وليس على نوعية الجينات المفردة. أغلب الطفرات الجينية تكون ضارة، ولكنها ليست معيبة لدرجة أن تُودي بكروموسوم جيِّد مباشرة. وهذا يعني أن بإمكانها أن تتراكم وأن تقلل من كفاءة الكروموسومات تدريجيًّا؛ مما يسهم في تكوُّن خلفية كروموسومية معيبة. ومن النادر أن تكون الطفرات الجينية البطيئة خطيرة لدرجة تكفي لأن تُعَطِّل أو تقتل، ولكنها تثبط النشاط الجيني وتقلل كفاءته في المتوسط بشكل غير محسوس.

ومن قبيل المفارقة أن الطفرات المفيدة، حينما تعمل في ظل خلفية كروموسومية معيبة، قد تُسبِّب الفوضى والأضرار. ولنفترض جدلًا أن هناك ٥٠٠ جين على أحد الكروموسومات، فيمكن أن يحدث أحد أمرين: إما أن تتم إعاقة انتشار التطافر الجيني من جراء ضعف الخلفية الكروموسومية، أو لا يحدث هذا. في الحالة الأولى يتبدَّد التأثير الجيِّد للانتقاء الإيجابي القوي لأحد الجينات بفعل الانتقاء الضعيف لـ ٤٩٩ جينًا الأخرى. ويكون التأثير الكلي في هذه الحالة متعادلًا، وهناك فرصة لا بأس بها أن يحدث فقدان للطفرة المفيدة مجددًا؛ لأن الجين لا يملك بالكاد مزية يفضلها الانتقاء الطبيعي. بتعبير

آخر، فإن التداخل بين الجينات على نفس الكروموسوم، والمسمى «التداخل الانتقائي»، يحجب فوائد الطفرات المهمة ويعوق الانتقاء.

إلا أن البديل الثاني يتميَّز بنوع من البراعة الساحرة. فتخيَّل أن هناك خمسين شكلًا مختلفًا من نفس الكروموسوم موزَّعة عشوائيًّا على مجتمعٍ ما من السكان، فإذا ظهرت طفرة جديدة تكون مفيدة بدرجة تكفي لأن تنتشر في المجتمع بكامله، فلا بد لها تحديدًا أن تزيح جميع الأشكال الأخرى من نفس الجين. وتكمن المشكلة في أنها لا تكتفي بإزاحة جميع الأشكال الأخرى من نفس الجين، ولكن جميع الأشكال الأخرى من جميع الجينات على نفس الكروموسوم، بمقتضى التنافس المحموم. فإذا حدثت الطفرة الجديدة على واحد من هذه الكروموسومات الخمسين، فلا بد حينئذٍ أن يُفقَد التسعة والأربعون كروموسومًا من ذلك المجتمع. وفي الواقع، إن الأمر أسوأ من هذا؛ إذ لا ينطبق هذا المبدأ على الجينات المرتبطة بنفس الكروموسوم فحسب، بل على جميع الجينات التي تتشارك في مصيرها داخل الكائن المستنسخ؛ أي جميع جينات الكائن. وعلى نحوٍ كارثيٍّ يتم هكذا فقدان كل التنوع الجيني عمليًّا.

عمومًا إذن، نقول إن الطفرات «السيئة» تفسد الكروموسومات «الجيدة»، بينما تبقى الطفرات الجيدة لصيقة بالكروموسومات «السيئة»؛ مما يسبب تآكل الكفاءة في كلتا الحالتين. وفي الحالات النادرة التي تُحدِث فيها طفرةٌ ما فارقًا كبيرًا، يكون للانتقاء القوي تأثير كارثي على التنوع الجيني. ويمكن إدراك نتاج ذلك بوضوح في كروموسوم Y الضعيف في الرجال، الذي لا يحدث له تأشيب مطلقًا.[٧] إن الكروموسوم Y مجرد ظلٍّ لكروموسوم X الأنثوي (الذي يحدث له تأشيب؛ لأن النساء لديهن نسختان من كروموسوم X)، وهو لا يزيد كثيرًا عن كونه جِذلًا به قليل من الجينات الباقية عليه، مختلطة بمقدار كبير من اللغو الجيني عديم المعنى. ولو كانت كل الكروموسومات بمثل ذلك القَدْر من التردِّي، لما كان ثمة أشكال ممكنة من الحياة المعقدة.

ولا تتوقَّف البراعة الساحرة عند هذا الحد؛ فكلما كان الانتقاء أقوى كان هناك احتمال أكبر أن تحدث إزاحة انتقائية لأحد الجينات أو غيره. وأي قوة انتقائية قوية يكون لها تأثيرها هنا، سواء أكانت الطفيليات أو المناخ، أو المجاعات، أو الانتقال والتشتت إلى أماكن معيشة جديدة، ومن ثم جاءت الرابطة بنظرية الملكة الحمراء، أو غيرها من نظريات التكاثر الجنسي. ويكون النتاج في كل حالة هو فقدان للتنوع الجيني؛ مما يسبب خفضًا للحجم الفعال للمجتمع السكاني. وبصفة عامة، تحتوي المجتمعات

الكبيرة على الكثير من التنوع الجيني، والعكس صحيح. والمجتمعات التي تتكاثر لا جنسيًّا (بالاستنساخ) تفتقد التنوع الجيني، مع كل عملية تطهير انتقائية. ومن منظور الآليات الجينية للمجتمعات السكانية، تتصرف المجتمعات الكبيرة (التي بالملايين) كأنها صغيرة (أي بالآلاف) وهذا يفتح الباب للصدفة العشوائية مجددًا. ومن ثمَّ يحوِّل الانتقاء المكثف حتى المجتمعات الضخمة إلى مجتمعات صغيرة الحجم في فعاليتها؛ مما يجعلها مهيضة الجناح وعرضة للانحلال والانقراض. وقد أظهرت سلسلةٌ من الدراسات أن هذا النوع بعينه من الفقر الجيني واسع الانتشار، ليس في المستنسخات فحسب، ولكن أيضًا في أنواع الكائنات التي لا تتزاوج إلا قليلًا جدًّا. والميزة الرائعة للتكاثر الجنسي هي أنه يسمح للجينات الجيدة بأن تتأشب بعيدًا عن الفوضى الضاربة في خلفياتها الجينية، بينما تحافظ بشكل فوري على قَدْرٍ كبير من التنوُّع الجيني المختفي ضمن المجتمعات السكانية.

وتُبيِّن النماذج الرياضية لبارتون وأوتو أن «التداخل الانتقائي» بين الجينات ينطبق على الأفراد، وليست المجتمعات فحسب. وفي الكائنات التي يمكنها أن تتكاثر جنسيًّا ولا جنسيًّا معًا، يمكن أن يتحكم جين واحد في مقدار الممارسة الجنسية. ويشير التغيُّر في معدل انتشار ذلك الجين الجنسي إلى نجاح التكاثر الجنسي بمرور الزمن. فإذا ارتفع معدل انتشاره يفوز التكاثر الجنسي، وإذا انخفض يفوز التكاثر اللاجنسي. ومن المهم أن نلاحظ أنه إذا ارتفع معدل انتشار ذلك الجين من جيل إلى الذي يليه نقول حينئذٍ إن التكاثر الجنسي ينفع الأفراد. وفي الواقع إنه يرتفع. ومن بين جميع الأفكار التي ناقشناها في هذا الفصل، يُعتبَر التداخل الانتقائي هو الأكثر تطبيقًا على نطاق واسع. ويكون التكاثر الجنسي أكثر نجاحًا من الاستنساخ (بالرغم من تكلفته المضاعفة) تحت جميع الظروف تقريبًا، ويكون الفارق أكبر ما يمكن حينما يكون المجتمع متنوعًا بدرجة عالية، ويكون معدل التطافر عاليًا، وضغط الانتقاء قويًّا؛ وهي ثالوث غير مقدس يجعل النظرية مناسبة بشكل جلي لتفسير منشأ التكاثر الجنسي نفسه.

لقد عانى بعضٌ من أفضل العقول في علم الأحياء في سبيل حل معضلة التكاثر الجنسي، ولكن لم يُقْدِم إلا قلة جريئة على تخمين أصله العميق ومناقشته. فهناك الكثير من الأمور غير المؤكدة بشأن نوعية الكيان أو البيئة التي نشأ التكاثر الجنسي فيها؛ ومن ثم يجب أن ننظر إلى أي تخمينات بشأن هذا الأمر بوصفها محض تخمينات لا أكثر. وحتى في

هذه الحالة، وبالرغم من المجادلات التي لا تزال مُستعِرة، فإن هناك نقطتين أعتقد أن أغلب المنتمين لهذا الحقل يمكن أن يتفقوا عليهما.

أولاهما أن السلف المشترك لجميع حقيقيات النوى قد مارس التكاثر الجنسي. بمعنى أننا لو أعدنا بحث الخصائص المشتركة للنباتات والحيوانات والطحالب والفطريات والكائنات الأولية، فسنجد أن التكاثر الجنسي هو واحد من الخصائص الرئيسية التي تُوجَد لدينا جميعًا بصفة مشتركة. إن الحقيقة القائلة إن التكاثر الجنسي سمة أساسية لحقيقيات النوى جلية بدرجة كبيرة. وإذا كنا ننحدر جميعًا من سلف مارس الجنس، والذي بدَوْره انحدر من البكتيريا اللاجنسية، إذن فلا بد أن يكون ثمة عنق زجاجةٍ ما لا يمكن أن تكون قد مرت منها إلا حقيقيات النوى الجنسية. ومن المفترض أن أوائل حقيقيات النوى كانت لا جنسية مثل أسلافها البكتيرية (لم يحدث أن انخرطت البكتيريا في التكاثر الجنسي) ولكنها اندثرت جميعًا.

والنقطة الثانية التي أعتقد أن الكل يتفق فيها معي تتعلق بالميتوكوندريا، التي هي «محطات توليد الطاقة» للخلايا حقيقية النوى. فلا خلاف الآن على أن الميتوكوندريا كانت فيما مضى من البكتيريا حرة المعيشة، ويبدو بصفة شبه مؤكدة أن السلف المشترك لحقيقيات النوى التي تعيش اليوم كان لديه ميتوكوندريا بالفعل. كما لا شك في أن هناك المئات إن لم يكن الآلاف من الجينات التي انتقلت من الميتوكوندريا إلى خلية العائل وأن «الجينات القافزة» التي ترصع جينومات جميع حقيقيات النوى تقريبًا مشتقة من الميتوكوندريا، ولا يخضع أيٌّ من هذه الملاحظات للجدل، ولكنها ترسم معًا لوحةً شديدةَ الوضوح لضغوط الانتقاء التي ربما دفعت إلى نشوء التكاثر الجنسي في المقام الأول.[٨]

حاوِلْ أن تتخيَّل الأمر: إنها أول خلية حقيقية النواة، وهي خلية هجينة، بها بكتيريا دقيقة الحجم تعيش داخل خلية عائل أكبر حجمًا. وكل مرة يموت فيها واحد من تلك البكتيريا المحتبسة داخليًّا تتحرر جيناتها؛ فتنهمر كالمطر على كروموسومات خلية العائل. وتدخل بعض شذراتها عشوائيًّا إلى كروموسوم العائل مستعينة بالطرق القياسية التي تتبعها البكتيريا في إدخال الجينات. وبعض هذه الجينات الجديدة يكون ذا قيمة، والبعض الآخر بلا فائدة، وإنما هي نسخ طبق الأصل من الجينات الموجودة بالفعل. ولكن بعضها يعمل كإسفين منحشر وسط جينات العائل فيقطعها قِطَعًا وشظايا. إن الجينات القافزة تلحق الفوضى بالخلايا، ولا تملك خلية العائل سبيلًا لكبح جماحها وإيقاف تناميها؛ ومن ثم نجدها تقفز مطلقة السراح نحو الجينوم، فتحشر أنفسها

بين الجينات، فتقطِّع الكروموسوم الدائري لخلية العائل إلى كروموسومات مستقيمة متعددة؛ وهي التي تُوجَد فينا جميعًا معشر حقيقيات النوى التي تعيش اليوم (انظر الفصل الرابع).

إنه حقًّا مجتمع سكاني شديد التنوع، يتطور سريعًا. إن الطفرات البسيطة تُكلِّف الخلية جدارها. وهناك طفرات أخرى تؤقلم الهيكل الخلوي البكتيري إلى الصورة الأكثر ديناميكية لحقيقيات النوى. ويُحتمَل أن خلية العائل تشكِّل ما بها من نواة وأغشية داخلية عن طريق نقل غير منظم للجينات الآتية من البكتيريا الداخلية وتستخدمها في تكوين الدهون (اللازمة لتكوين أغشية النواة وغيرها). ولا يحتاج أيٌّ من هذه التغيرات للقفز إلى المجهول؛ فجميع الخطوات يمكن أن تنشأ بإجراء نقلات جينية بسيطة وطفرات صغيرة. ولكن تُعتبَر التغييرات، جميعها تقريبًا، ضارة. فمقابل كل منفعة هناك ألف من الخطوات غير الموفقة، والطريق الوحيد لصياغة كروموسوم لا يقتلك والطريق الوحيد لضمِّ أفضل الإبداعات والجينات معًا داخل خلية واحدة هو التكاثر الجنسي، التزاوج بكامل معناه، وليس مجرد عملية مقايضة ضعيفة وجزئية للجينات. والتكاثر الجنسي وحده يمكنه أن يجمع بين غشاء خلوي من إحدى الخليتين وهيكل خلوي ديناميكي، أو آلية لتوجيه البروتينات من الخلية الأخرى، ويمنع في الوقت نفسه جميع الإخفاقات. إلا أنَّ القدرة العشوائية للانقسام الاختزالي ربما «تسحب» فائزًا واحدًا بالجائزة من بين ألف متسابق (أو من الأنسب أن نقول: باقيًا واحدًا على قيد الحياة) ولكنه على أي حال أفضل بكثير جدًّا من الاستنساخ. ففي مجتمع متنوع ومتغاير، ومع وجود معدل مرتفع في الطفرات الجينية وضغوط انتقائية مكثفة (ناتجة جزئيًّا عن ذلك الوابل من الجينات القافزة الطفيلية) لا يصلح الاستنساخ، بل يُحكَم عليه بالبوار. ولا غرو أن يكون الجنس هو وسيلة التكاثر السائدة؛ فدون هذا التزاوج، لم يكن لنا نحن حقيقيات النوى أن نُوجَد في هذه الدنيا مطلقًا.

والسؤال الآن هو: إذا كان الاستنساخ محكومًا عليه بالبوار كما قلنا، فهل استطاع التكاثر الجنسي أن ينشأ ويتطوَّر بسرعة تكفي ليأخذ دوره ووظيفته في الحياة؟ والإجابة، التي ربما تثير الدهشة، هي «نعم». كان من اليسير أن ينشأ التكاثر الجنسي كآلية ويتطور بسهولة. ومن الناحية الجوهرية للتكاثر الجنسي ثلاثة أوجه هي: الاندماج الخلوي، وفصل الكروموسومات، والتأشيب. ولنُلْقِ نظرة سريعة على كلٍّ منها على التوالي.

الاندماج الخلوي هو أمرٌ يكاد يكون غير ممكن في البكتيريا؛ لأن الجدار الخلوي يُفقَد جزئيًّا في هذه العملية، لكن حين تزول الجُدُر بين الخلايا قد تكون المشكلة معكوسة؛

إذ يصير من العسير تجنُّب الاندماج. فكثير من حقيقيات النوى البسيطة، مثل العفن الغروي والفطريات، تندمج خلاياها معًا لتكوِّن خلايا عملاقة عديدة النوى. وتتكون شبكات مفككة من الخلايا يُسمَّى كلٌّ منها «مدمج خلوي» بانتظام كجزء من دورات الحياة حقيقية النوى البدائية. وتستفيد الجينات القافزة المتطفلة، وكذلك الميتوكوندريا، من اندماج الخلايا معًا؛ إذ يمكنها حينئذٍ أن تصل إلى عوائل جديدة. ولقد تبيَّنَ وجود عوامل عدة تحث على الاندماج الخلوي. وفي هذا السياق، قد تكون المشكلة الأصعب هي استحداث طرق لمنع الاندماج الخلوي. ومن ثم نقول إن أول متطلبات التكاثر الجنسي، وهو الاندماج الخلوي، لم يكن — تقريبًا — يُمثِّل مشكلة.

أما فصل الكروموسومات، فيبدو للوهلة الأولى أكثر إثارةً للتحدِّي. ولتتذكر أن الانقسام الاختزالي هو بمنزلة رقصة معقَّدة للكروموسومات التي تبدأ بشكل غير متوقع؛ إذ يحدث تضاعف في عدد الكروموسومات قبل أن تنفصل إلى أربع خلايا وليدة. فلماذا نصِفُ الانقسام الاختزالي بأنه معقَّد؟ في الواقع إنه ليس كذلك تمامًا؛ فمن المفترض بصفة عامة أنه ليس أكثر من عملية تعديل لطريقة الانقسام الخلوي الموجودة والعادية التي نعرفها باسم الانقسام الفتيلي (غير المباشر)، التي تبدأ أيضًا بمضاعفة عدد الكروموسومات. ويُرجَّح أن يكون الانقسام الفتيلي قد نشأ عن طريق تتابع بسيط للخطوات التي تحدث في عملية الانقسام الخلوي البكتيري، حسبما قال توم كافالير سميث، الذي استطرد في قوله؛ فأشار إلى أنه لا يُوجَد سوى تغيير أساسي ضروري واحد فقط لتحويل الانقسام الفتيلي إلى صورة بدائية من الانقسام الاختزالي، وهو أن يحدث إخفاق في هضم كل مقدار «الغراء» (المتكوِّن من مواد بروتينية تُسمَّى كوهيسين) الذي يربط الكروموسومات معًا. فبدلًا من أن تدخل الخلية في دورة أخرى من التضاعف الخلوي، لمضاعفة الكروموسومات مجددًا، فإن الخلية تتوقف لبرهة، ثم تعاود العمل ولكن في فصل الكروموسومات. وفي الواقع، إن الغراء المتبقي يُربِك الخلية ويجعلها تظن أنها يجري تمهيدها للجولة التالية من الفصل الكروموسومي قبل أن تتم الجولة الأولى.

ويكون نتاج هذا هو خفض عدد الكروموسومات، الذي افترضه كافالير سميث، والذي هو في الحقيقة الفائدة الأساسية للانقسام الاختزالي في المقام الأول. ولو لم تقدر أوائل الخلايا حقيقية النوى على التوقُّف عن الاندماج معًا لتشكيل شبكات خلوية بها كروموسومات متعددة (كما لا يزال يحدث اليوم في العفن الغروي) لكان من الضروري أن يحدث شكلٌ ما من الانقسام الاختزالي لتجديد الخلايا البسيطة بمجموعة واحدة من

الكروموسومات. وقد ساعد الانقسام الاختزالي عن طريق إحلاله محل الطريقة القياسية للانقسام الخلوي على تحقيق تجديد الخلايا المنفردة، وقد حقَّقَ هذا بأقلِّ قَدْر من الإزعاج الناتج عن وجود آلية للانقسام الخلوي.

وهذا يأخذنا إلى الوجه الأخير للتكاثر الجنسي وهو التأشيب، أو إعادة تجميع الجينات. ونقول مجددًا إن نشوء التأشيب لا يُمثِّل مشكلة؛ إذ إن جميع التجهيزات اللازمة موجودة في البكتيريا بالفعل، وقد تمَّتْ وراثتها ببساطة. وليست التجهيزات فقط، بل إن طريقة التأشيب بالتحديد هي نفسها التي تحدث في البكتيريا وفي حقيقيات النوى. فقد دأبت البكتيريا على أخذ جينات من البيئة (عن طريق عملية تُسمَّى النقل الجيني الجانبي) وإدخالها ضمن كروموسومها بالتأشيب. وفي حقيقيات النوى الأولى، لا بد أن نفس التجهيزات كانت مسئولة عن إدخال الجينات البكتيرية التي انهمرت كالمطر من الميتوكوندريا؛ مما أدى إلى التوسُّع المستمر في أحجام الجينومات. وكما قال تيبور فيلاي من جامعة إيوتفوس لوراند بالعاصمة المجرية بودابست، فمن المرجح أن فائدة التأشيب في حقيقيات النوى الأولى كانت التحميل الجيني، كما في البكتيريا. ولكن ضغط تجهيزات التأشيب لأداء دور أكثر عمومية في الانقسام الاختزالي كان بالتأكيد إجراء شكليًّا مفروغًا منه.

وهكذا من الأرجح أن نشوء التكاثر الجنسي لم يكن صعبًا؛ فقد كان مقدرًا له من الناحية الآلية أن يحدث. ولكن يعتبر علماء الأحياء أن المفارقة الأكثر عمقًا بالنسبة للتكاثر الجنسي هي أنه مستمر على طول المدى. ليست قضية الانتقاء الطبيعي هي «البقاء للأصلح»؛ إذ إن البقاء لا قيمة له إذا فشل الكائن الأصلح في تحقيق التكاثر. منح التكاثر الجنسي تفوقًا مبدئيًّا عظيمًا للاستنساخ، ولكنه كان له الغلبة بعد ذلك بين جميع حقيقيات النوى تقريبًا. ولم تكن الميزة التي قدَّمَها التكاثر الجنسي في البداية — على الأرجح — مختلفة عما يُقَدِّمه اليوم؛ وهي القدرة على ضَمِّ أفضل تجميعات للجينات في نفس الفرد، والتخلص من الطفرات الضارة، وإدخال عدة ابتكارات قيِّمة. ولعلَّ التكاثر الجنسي في تلك الأيام أنتج فائزًا واحدًا فقط، أو حتى كائنًا ضعيفًا حيًّا، من كل ألف حالة فشل، ولكن هذا لم يزل يُعتبَر أفضل من الاستنساخ، الذي مصيره الهلاك والبوار. وحتى في يومنا هذا قد يُنتِج التكاثرُ الجنسيُّ نصفَ عدد الذرية التي ينتجها الاستنساخ ولكنها أكثر كفاءة وصلاحية بمقدار الضعف.

ومن قبيل المفارقة أن هذه الأفكار بدأت عند بداية القرن العشرين، ثم تراجعت عن الصدارة لتعود في ثوب أكثر قشابة، مع تهاوي النظريات الأنيقة على طول الطريق.

إنها تفسر التكاثر الجنسي من حيث فائدته للأفراد، ولكن ما يشرح الصدر أنها تضم أيضًا النظريات الأقدم على نحوٍ مشابهٍ لما يحدث في عملية التكاثر الجنسي ذاتها؛ إذ يتم التخلص من الأفكار المضللة، وتوفيق الأفكار المثمرة معًا في نظرية واحدة، كالجينات التي يُعاد تجميعها على الكروموسوم. فالأفكار أيضًا تتطوَّر بهذه الصورة على نحوٍ أفضل، وكلنا المستفيدون.

الفصل السادس

الحركة

القوة والبهاء

لا بد أن مقولة «للطبيعة أنياب ومخالب مخضَّبة بالدماء.» هي واحدة من أكثر المقولات المنسوبة إلى داروين ورودًا على الألسنة. وهذه المقولة — على أي حال — تمسُّ المعنى المطلوب إبرازه، فحتى إذا لم تتعلَّق بالانتقاء الطبيعي نفسه فإنها تتعلَّق على الأقل بالإدراك العام لهذا الموضوع. وقد أُخذت أصلًا عن قصيدة تأملية بعنوان «في ذكراه» للشاعر تنيسون، الذي أنهاها في عام ١٨٥٠ قبل نشر كتاب داروين «أصل الأنواع» بتسع سنوات. كانت القصيدة استجابة لوفاة صديق تنيسون، الشاعر آرثر هالام، ويعتمد السياق المباشر للأبيات على مفارقة كئيبة بشكل صادم للمشاعر بين حب الرب ولامبالاة الطبيعة. وقد قال تنيسون على لسان الطبيعة إنه ليس الأفراد وحدهم هم مَن يهلكون، وإنما الأنواع الأخرى من الكائنات أيضًا: «لقد ضاع ألف نوع؛ فلماذا أهتم وكل شيء في الدنيا سيذهب؟!» في حالتنا نحن تعني عبارةُ «كل شيء» كلَّ ما نعتبره عزيزًا في هذه الدنيا؛ الغاية والحب والحقيقة والعدالة والرب. ومع أن تنيسون لم يفقد إيمانه، فإنه في بعض الأوقات كانت تعصف به الشكوك والأوهام.

هذه النظرة القاسية للطبيعة، التي صارت تُعزى فيما بعد إلى الضغوط الطاحنة للانتقاء الطبيعي، حدث هجوم عليها من عدة محاور. وإذا أخذنا الفكرة حرفيًّا فسنجد أنها — حتى في أحسن صورها — تتجاهل الحيوانات العاشبة والنباتات والطحالب والفطريات والبكتيريا وغيرها، وتختزل الحياة كلها في ذلك الصراع المحموم بين المفترس والفريسة. وحتى إذا أخذناها مجازيًّا، باعتبارها تُعَبِّر عن صراع أعمَّ من أجل البقاء

— الذي يراه داروين — فإنها تَمِيل لأن تقلِّل من أهمية التعاون بين الأفراد وأنواع الكائنات، بل والجينات التي داخل الفرد نفسه؛ أي أهمية التكافل في الطبيعة. لا أريد أن أسهب في الحديث عن التعاون هنا، بل سأضع نصب عينيَّ أهمية عملية الافتراس؛ وتحديدًا الطريقة التي أَدَّتْ بها إلى دفع خاصية الحركة، التي غَيَّرت شكل العالم الذي نعيش فيه منذ زمن بعيد.

إن مقولة «للطبيعة أنياب ومخالب مخضبة بالدماء.» تشي بفكرة الحركة؛ فعلى أي مفترس أن يمسك بفريسته أولًا، وهذا ليس بفعل سلبي. ثم بعد ذلك عليه أن يُطْبِق فكَّيْه عليها، وهو ما يتطلب حركة فتح ثم إغلاق للفم بقوة؛ فالعضلات هنا ضرورية. والمخالب أيضًا لا يمكنها التمزيق بسهولة إن لم تكن تعمل بشراسة تدفعها حركة العضلات. وأفترض أننا إذا حاولنا أن نتخيَّل صورة سلبية للافتراس فقد نأتي بشيء مثل الفطر، لكن حتى في هذه الحالة يُوجَد شكلٌ ما من الحركة، حتى لو كانت مجرد الالتفاف البطيء لخيوط الفطر. ولكن فكرتي الأساسية هي أننا لا يمكن أن نتخيَّل الافتراس كوسيلة للحياة بدون حركة. ومن ثم، فإن الحركة هي الإبداع الأكثر عمقًا والأشد غورًا. فلِكَيْ يمسك المفترس بالفريسة ويلتهمها؛ فلا بد أولًا أن يتعلم الحركة، سواء أكان المفترس وحيد الخلية كالأميبا الدقيقة التي تزحف وتبتلع دقائق الطعام، أم كان حيوانًا مفترسًا كالفهد بقوته وسرعته ورشاقة حركته.

لقد غَيَّرَت الحركةُ شكلَ الحياة على الأرض بطرق قد لا تكون واضحة بشكل فوري، بدءًا من تعقيد الأنظمة البيئية إلى سرعة واتجاه النشوء والتطور بين الكائنات. وهذه القصة يدل عليها سجل الحفريات، الذي يمنحنا نظرة متعمقة — وإن كانت غير مثالية لشبكات التفاعلات بين أنواع الكائنات، والطريقة التي تتغير بها تلك التفاعلات بمرور الزمن. ومما يبدو خادعًا أن سجل الحفريات يُشِير إلى حدوث تغيُّر مفاجئ في درجة التعقيد إثر حالة الانقراض الجماعي الأعظم للكائنات في تاريخ كوكبنا، التي حدثت عند نهاية العصر البرمي، منذ ٢٥٠ مليون سنة؛ إذ يُعتقَد أن ٩٥ بالمائة من جميع أنواع الكائنات اختفت في ذلك الحين. وبعد حدوث هذه الحالة الشاملة من الانقراض، لم يَبْقَ أي شيء على حاله مجددًا.

لقد كان العالم معقدًا بما يكفي بالطبع قبل العصر البرمي؛ فعلى الأرض كانت تُوجَد أشجار عملاقة ونباتات سرخسية وعقارب ويعاسيب وبرمائيات وزواحف. وكانت البحار تعج بثلاثيات الفصوص والأسماك، والقروش وأصداف الأمونية والأصداف المصباحية

البائدة، وزنابق البحر (وهي أشباه الزنابق البحرية المسوقة، التي اختفت تمامًا تقريبًا في حركة الانقراض البرمية) والمرجانيات. وقد يوحي الفحص المتعجل لهذه الحالة بأن بعض «أنماط» الكائنات تلك قد تغيَّرت، مع أن الأنظمة البيئية لم تكن مختلفة تمامًا، إلا أن البيان التفصيلي يقول شيئًا آخر.

يمكن تقدير درجة تعقيد أحد الأنظمة البيئية عن طريق العدد النسبي لأنواع الكائنات؛ فإذا ساد عدد قليل من الأنواع، بينما لم تنَلْ بقية الأنواع إلا وجودًا هامشيًّا، يقال إن النظام البيئي بسيط. ولكن إذا وُجِدَت أعداد كبيرة من الأنواع معًا بأعداد متماثلة، فإن النظام البيئي حينئذٍ يُعتبَر أكثر تعقيدًا بكثير، مع وجود شبكة أوسع من التفاعلات بين الأنواع. ويمكن عن طريق إحصاء عدد الأنواع التي تعيش معًا في وقت معين في سجل الحفريات أن نتوصَّل إلى «مؤشر» للتعقيد، ونتائج هذا الإحصاء تُثِير الدهشة بعض الشيء. فبدلًا من أن يحدث تعقيد تدريجي على مَرِّ الزمن، فقد حدث على ما يبدو تغيُّر مفاجئ بعد حركة الانقراض البرمية الهائلة. فقبل الانقراض على مدى حوالي ٣٠٠ مليون سنة، انقسمت الأنظمة البيئية البحرية مناصفةً تقريبًا بين البسيط منها والمعقد. وفيما بعد رجحت كفة الأنظمة المعقدة على البسيطة حتى صارت النسبة ثلاثة إلى واحد، وهو تغيُّر مستقر ومستمر؛ إذ استمرَّ ٢٥٠ مليون سنة أخرى حتى اليوم. ومن ثم، بدلًا من أن يكون التغيُّر تدريجيًّا، كانت النقلة فجائية. فلماذا؟

يقول عالم الحفريات الأمريكي بيتر واجنر، من متحف فيلد للتاريخ الطبيعي في شيكاجو، إلينوي إن الإجابة هي انتشار الكائنات المتحركة. وتلك النقلة التي حدثت حوَّلَتْ عالم كائنات المحيطات من وضع التعلُّق بالموقع الثابت — مثل الأصداف المصباحية والزنابق البحرية … إلخ، التي تقوم باستخلاص الطعام بالترشيح للحصول على معيشة هزيلة قليلة الطاقة — إلى عالم جديد أكثر نشاطًا تسوده حيوانات تتحرك هنا وهناك، حتى وإن كانت الحركة بطيئة، مثل القواقع وقنافذ البحر والسرطانات. كانت هناك حيوانات كثيرة تتحرك بنشاط قبل الانقراض بالطبع، ولكنها لم تَسُدْ في عالمها إلا فيما بعد. ليس معروفًا سبب حدوث هذا التحوُّل بعد انقراض العصر البرمي الشامل، ولكن ربما كانت له علاقة بعملية مواجهة عالم يضم نمطًا متحركًا للمعيشة. فالبيئات سريعة التغيُّر تفرض عليك التحرك بنشاط؛ ومن ثم تحتاج قَدْرًا أكبر من المرونة البدنية. لذا، فربما الذي حدث أن الحيوانات الأكثر تحركًا كانت لها أفضلية في النجاة من التغيرات البيئية الشديدة التي صاحبت وقوع الكارثة (تجد المزيد عن هذا في الفصل الثامن) ولم

تستطع الكائنات البائسة التي ترشح طعامها أن تصنع شيئًا في مواجهة هذه الضربة القاصمة.

وأيًّا كانت الأسباب، فإن نشوء تلك الحيوانات بعد زمن الانقراض البرمي قد غيَّرَ شكل الحياة. كان من تبعات الحركة الإيجابية أن صارت الحيوانات تتصارع فيما بينها كثيرًا جدًّا، حرفيًّا ومجازيًّا، مما أتاح بدوره استحداث شبكة من التفاعلات القوية بين الأنواع، لا يعني هذا مجرد زيادة في معدل الافتراس، وإنما المزيد من الرعي والسعي وراء الطعام، وحفر الجحور للاختباء بها. كانت تُوجَد أسباب وجيهة دائمًا للحركة، ولكن طرق المعيشة الجديدة التي جاءت معها الحركة منحت الحيوانات سببًا معينًا لتكون في مكان معين في وقت معين، وتحديدًا أن تُوجَد في مكان مختلف في وقت مختلف. يعني هذا أنها منحتها هدفًا؛ أي سلوكًا مقصودًا وموجهًا إلى هدف منشود.

إلا أن فوائد الحركة تتجاوز طريقة المعيشة؛ إذ إن الحركة أيضًا تؤثِّر في وتيرة التطور والمعدل الذي تتغيَّر به الجينات وأنواع الكائنات على مدى الزمن التطوري. ففي حين أن أسرع الكائنات تطورًا هي الطفيليات والبكتيريا المسببة للأمراض، التي يتحتم عليها أن تتعامل مع ما يُستحدَث في جهاز المناعة من ابتكارات ووسائل قوية ومستمرة لمكافحة تلك الكائنات الضارة — فالحيوانات بهذا تضغط عليها بقوة أجهزتها المناعية — فعلى النقيض من هذا نجد الكائنات التي تتغذى بالترشيح والنباتات بصفة عامة تكون ثابتة في أماكنها فلا تتطور بسرعة. وعلى هذا تكون فكرة الملكة الحمراء التي تُضطَر للجري في مكانها، على الأقل بالنسبة لمنافسيها، هي فكرة غريبة عن عالم المتغذيات بالترشيح التي تبقى بالضرورة دون تغيُّر على مدى دهور قبل أن تصيبها جائحة. إلا أن هناك استثناء لهذه القاعدة الذهبية تركز مجددًا على أهمية الحركة؛ هذه هي النباتات الزهرية.

قبل كارثة الانقراض في العصر البرمي، لم تكن ثمة نباتات زهرية يمكن رؤيتها، فكان عالم النبات ذا لون أخضر خالص، مثل الغابات الصنوبرية في يومنا هذا. ثم جاء تفجُّر الألوان في الأزهار والثمار بكاملها استجابةً لعالم الحيوان؛ فالأزهار — بطبيعة الحال — تجذب الكائنات اللاقحة، والحيوانات المتحركة، التي تنقل حبوب اللقاح من نبات لآخر، فتنتشر على نطاق واسع فوائد التكاثر الجنسي للنباتات اللاسويقية، كما أن الثمار تحتاج إلى حركة الحيوانات والتهامها لها ثم طردها مع فضلاتها لنشر البذور. ومن ثم سايرت النباتات الزهرية الحيوانات في تطورها، مع ترابطهما معًا، فالنباتات

تشبع أعمق رغبات الكائنات اللاقحة وآكلات الثمار، بينما الحيوانات، دون إدراك منها، تنجز حِيَل النباتات الصامتة، على الأقل إلى أن بدأنا نحن البشر في إنتاج ثمار بلا بذور. وهذا التشابك في المصائر زاد في وتيرة التطور بين النباتات الزهرية لتتلاءم مع شركائها من الحيوانات.

ومن ثم فإن الحركة تجلب معها الحاجة للتعامل مع البيئات المتغيرة سريعًا، والمزيد من التفاعلات بين النباتات والحيوانات الأخرى، وطرق حياة جديدة مثل الافتراس، وأنظمة بيئية أكثر تعقيدًا. وجميع هذه العوامل شجعت على استحداث حواس أفضل (وهي وسائل أفضل لـ «معايشة» العالم الخارجي)، والإسراع بوتيرة التطور؛ وذلك من أجل الاستمرارية، ليس بين الحيوانات فحسب ولكن بين النباتات أيضًا. وفي قلب هذا الإبداع كله يقع ابتكار محدد جعل كل هذا ممكنًا؛ وهو العضلات. مع أن العضلات قد لا تُحدث نفس انطباع المثالية الذي تُحدثه أعضاء أخرى مثل العين، فحين ننظر إلى العضلات من خلال المجهر نجدها عبارة عن حزم من الألياف التي تؤدِّي وظائف محددة مفيدة بدرجة مذهلة وتعمل في تناغم لتوليد القوة والحركة، وهي بمنزلة آلات تحوِّل الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية. وهذا إبداع أعظم من إبداعات ليوناردو دافنشي، ولكن كيف صارت هذه الآلة المفيدة الهادفة إلى ما هي عليه؟ سوف ننظر في هذا الفصل في أصل وتطور الآلية الجزيئية التي تدفع إلى الانقباض العضلي، الذي مكَّن بدوره الحيوانات من أن تغيِّر شكل العالم بمعنى الكلمة.

بشكلها المميز، تجذب العضلات الانتباه إليها أكثر من أشياء أخرى كثيرة، وتثير الصورة الذكورية المرتبطة بها الشعور بالانجذاب (من ناحية الإناث) أو الحسد (من جانب الذكور)، بدءًا من أخيل الإغريقي إلى أبطال كمال الأجسام في يومنا هذا. ولكن المظاهر الخارجية ليست كل شيء. وعلى مر التاريخ اجتهد بعضٌ من أعظم المفكرين والتجريبيين في محاولة فهم الكيفية التي تعمل بها العضلات بالفعل. ومن أرسطو إلى ديكارت، كانت الفكرة السائدة لديهم أن العضلات لا تنقبض بالأساس وإنما تنتفخ، مثل الغرور المرتبط بالأشخاص الذين لديهم عضلات قوية. وكانوا يعتقدون أن هناك سيلًا من الأرواح الحيوانية غير المرئية وعديمة الوزن تتدفق من تجاويف المخ خلال الأعصاب المجوفة وصولًا إلى العضلات فتجعلها تقصر مع انتفاخها. بل إن ديكارت نفسه بنظرته الآلية إلى الجسم، زعم وجود صمامات دقيقة في العضلة؛ مفترضًا أنها تمنع التدفق العكسي للأرواح الحيوانية، بنفس الطريقة التي تعمل بها الصمامات في الأوعية الدموية.

ولكن لم يمر وقت طويل بعد ديكارت في عقد الستينيات من القرن السابع عشر حتى ظهر اكتشاف محدد قَلَبَ هذه الأفكار التي طال التعلق بها رأسًا على عقب؛ فلقد أظهر العالم التجريبي الهولندي يان سوامردام أن حجم العضلة لا يزداد مع انقباضها، بل إنه ينكمش قليلًا جدًّا. وإذا كان حجم العضلة يقل، فمعنى هذا أنها لا يمكن أن تنتفخ بالأرواح الحيوانية كأنها مثانة. سرعان ما ظهر بعد ذلك في عقد السبعينيات من نفس القرن رجل هولندي آخر هو رائد استخدام الميكروسكوب واسمه أنتوني فان لوفنهوك، الذي استخدم عدساته الزجاجية الرائعة في البداية لفحص البنية المجهرية للحم الحيواني. فوصف وجود ألياف رقيقة تتكون من «كريات دقيقة جدًّا يتصل بعضها ببعض»، وتنتظم معًا في شكل سلسلة؛ أو على الأحرى تُوجَد آلاف من السلاسل تتكوَّن من هذه الكريات لتكوِّن تركيبة اللحم. ثم جاء رجل إنجليزي، هو ويليام كرون، فتخيَّل أن الكريات ربما تعمل كمثانات مجهرية تجعل شكل العضلة يمتلئ دون أن تغير بالضرورة حجمها الكلي.[1] ولم يستطع تفسير كيفية حدوث افتراضه هذا الذي كان ضربًا من الخيال، ولم تتمكن إمكانياته المعملية من إثباته. ثم افترض عدد من العلماء الرواد أن امتلاء تلك المثانات المزعومة يحدث بشكل انفجاري بالمعنى الحرفي؛ إذ افترض جون مايو على سبيل المثال أن الأرواح الحيوانية عبارة عن «دقائق نيتروجين هوائية»، وقال إن الأعصاب هي مصدرها وإنها تختلط بدقائق كبريتية من الدم لإحداث انفجار يشبه انفجار البارود.

لم تستمر هذه الأفكار المغلوطة كثيرًا؛ فبعد مرور ثماني سنوات من الملاحظات المبكرة للوفنهوك، قام مرة أخرى بفحص «كرياته» المزعومة مجددًا بعدسات جديدة محسنة، وبناءً على ذلك قدَّم اعتذارًا عما قاله سابقًا؛ إذ اكتشف أن ألياف اللحم لم تكن سلاسل طويلة من مثانات دقيقة بل هي ألياف تقطعها بالعرض ما أسماها «حلقات وتجاعيد» منتظمة، وهذه الخطوط هي التي أعطت الانطباع بوجود الكريات. الأدهى من هذا أن لوفنهوك حينما فتَّتَ الألياف ونظر إلى محتوياتها تحت عدساته أدرك أنها أيضًا تمتلئ بخيوط أشد دقة، قد تصل إلى مائة أو نحو ذلك في كل ليفة. تتغيَّر المصطلحات، ولكن القطع التي وصفها لوفنهوك تُعرَف اليوم باسم «القُسيمات العضلية»، بينما تُعرَف الخيوط أو الشعيرات الدقيقة الموجودة داخل الليفة العضلية باسم «اللييفات العضلية». ومن الواضح أن الانقباض العضلي لا علاقة له بالمثانات المنتفخة، بل إن كل شيء فيه إنما يتعلَّق بالألياف العضلية وحسب.

وحتى في هذه الحالة، ومع أن العلماء افترضوا أن الألياف الحركية في العضلات يمكن بطريقة ما أن «ينزلق» بعضها على بعض، فلم تكن لديهم فكرة حقيقية عن القوة التي تدفعها إلى الحركة. ثم مَرَّ قرن كامل تقريبًا قبل أن تبزغ قوة جديدة لعلها هي التي تبثُّ النشاط في كل تلك الألياف؛ وهي الكهرباء.

ففي عقد الثمانينيات من القرن الثامن عشر ذُهِل لويجي جلفاني — أستاذ التشريح بجامعة بولونيا — حينما انقبضت عضلة ساق أحد الضفادع بقوة حينما لمسها بمبضع في نفس الوقت الذي انطلقت فيه شرارة من آلة كهربائية على الجانب الآخر من الحجرة، مع أن الضفدع كان ميتًا. وقد حصل على نفس ردِّ الفعل حينما أحدث قطعًا بجسم الحيوان ومس خطافًا نحاسيًّا بمبضع مع إمرار شحنة كهربائية، كما حدث هذا في أحوال أخرى مختلفة بما فيها العاصفة الكهربائية. وقد جذبت فكرة الحركة العضلية بفعل الكهرباء، التي سريعًا ما سُمِّيَت الجلفانية، الكاتبة ماري شيلي، التي درست تقارير جلفاني قبل أن تؤلِّف روايتها المرعبة «فرانكنشتاين» في عام ١٨٢٣. وفي الواقع إن ابن أخي جلفاني، وهو جيوفاني ألديني، كان رجلًا سبَّاقًا. إذ طاف في أرجاء أوروبا في بدايات القرن التاسع عشر ليظهر «إعادة تنشيط جثث الموتى باستخدام الكهربية الجلفانية»، وفي مناسبة مشهورة قام ألديني بصعق رأس مفصول لرجل ميت أمام الحاضرين من الجراحين والأطباء والأدواق، بل وأمير ويلز، في كلية الجراحين الملكية بلندن. ويقول ألديني إنه حينما وضع قضبانه الكهربائية على فم الميت وأذنه: «بدأ الفك يرتعش، والعضلات المجاورة له تلتوي بشكل مخيف، وانفتحت العين اليسرى بالفعل.»

كما تأثَّر أيضًا الطبيب الإيطالي أليساندرو فولتا من جامعة بافيا باكتشافات جلفاني، ولكنه لم يتفق معه على سببها؛ فقد أصر فولتا على عدم وجود أي عامل كهربائي فيما يتعلَّق بالجسم نفسه، وأن الجلفانية هي مجرد رد فعل للشحنات الكهربية الخارجية التي تولدت من المعادن. وذهب إلى أن الساق يمكن أن توصل الكهرباء بنفس الطريقة مثل المياه المالحة؛ فهي مجرد خاصية سلبية. وقد دخل جلفاني وفولتا في خلاف استمرَّ عقدًا كاملًا، وانقسم مؤيدو كلٍّ منهما إلى فريقين على النمط الإيطالي الحقيقي؛ فمؤيِّدو المذهب الكهربي الحيواني ضد مؤيِّدي المذهب المعدني، وعلماء الفسيولوجيا ضد علماء الفيزياء، وبولونيا ضد بافيا!

كان جلفاني مقتنعًا بأن «كهربيته الحيوانية» تأتي بالفعل من الداخل، ولكنه وجد صعوبة في إثبات هذا، وهو ما أرضى فولتا. يُظهِر هذا النزاع بجلاءٍ قدرةَ التشكُّك على

تحفيز التفكير التجريبي. وحينما كان جلفاني يبتكر تجاربه لإثبات نظريته، توصَّل إلى أن العضلات في جوهرها «قابلة للتهيج»؛ أي إنها قادرة على توليد رد فعل لا يتناسب مع شدة العامل المؤثر بل يتجاوزه. بل إنه افترض أن العضلات يمكن أن تولِّد الكهربية داخل نفسها بتراكم شحنات سالبة وموجبة عَبْر سطحيها الداخليين، وقال إن التيار الكهربي يتدفق عَبْر مسام تنفتح بين السطحين.

إن ما سبق كلام خياليٌّ حقًّا، ولكن ما يُحزن القلب أن حالة جلفاني أظهرت قدرة المنتصر على كتابة التاريخ، حتى في مجال العلوم.[٢] فحينما رفض جلفاني أن يحلف يمين الولاء لنابليون، الذي كانت جيوشه حينئذٍ تحتل إيطاليا، جُرِّدَ من منصبه بجامعة بولونيا ومات فقيرًا في العام التالي. اختفت أفكاره لعقود، وعلى مدى وقت طويل كان البعض يتذكره باعتباره مجرد مناصر لفكرة القوى الحيوانية الخفية وباعتباره غريم فولتا. وعلى النقيض من هذا، فقد منح نابليون فولتا لقب كونت لومباردي في عام ١٨١٠، ثم أطلق اسمه على وحدة قياس الجهد الكهربائي «الفولت». وبالرغم من حصول اسم فولتا على أسبقية في تاريخ العلوم لاختراعه أول بطارية حقيقية، وهو المركم الفولتي، فإنه كان مخطئًا بمعنى الكلمة فيما يتعلَّق بالكهربية الحيوانية.

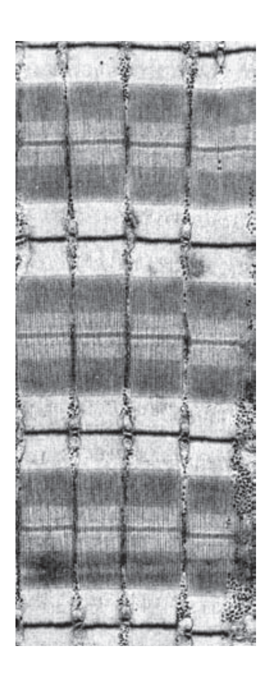
وفي القرن التاسع عشر، عادت أفكار جلفاني إلى دائرة الضوء بشكلٍ جادٍّ من جديد، وكان من تبنَّاها بالأساس المدرسة الألمانية لأبحاث الفيزياء الحيوية التي كان أشهر أعضائها العالم الكبير هيرمان فون هلمهولتز. لم تقتصر هذه المدرسة على إثبات أن العضلات والأعصاب مشحونة بكهربية حيوانية، بل إن هلمهولتز حسب سرعة انطلاق النبضة الكهربائية خلال العصب، مستخدمًا طريقة استحدثها الجيش لتقدير سرعة إطلاق قنابل المدافع. وقد تبيَّن أن سرعة إرسال النبضات العصبية بطيئة بشكل ملحوظ؛ فهي بضع عشرات من الأمتار في الثانية، وليست مئات الكيلومترات في الثانية كالكهربية العادية؛ مما أوحى بوجود شيءٍ ما مختلف فيما يتعلَّق بالكهربية الحيوانية. وسرعان ما عُزيَ هذا الفارق إلى الحركات المتثاقلة للذرات المشحونة، أو الأيونات، مثل البوتاسيوم والصوديوم والكالسيوم؛ التي ليست مثل الإلكترونات الكهربية في انطلاقاتها السريعة كالسراب. وإن مرور الأيونات عَبْر غشاء ما ينتج موجة من إزالة الاستقطاب، التي هي تأرجح عابر لشحنة سالبة خارج الخلية. وهذا يؤثر على الغشاء المجاور؛ ومن ثم تندفع الشحنة إلى الأمام على طول العصب، أو إلى داخل العضلة فيما يُسمَّى «جهد الفعل».

ولكن كيف تحديدًا يقف جهد الفعل وراء الانقباض العضلي؟ الإجابة عن هذا السؤال تستلزم إجابة عن سؤال أساسي أكبر هو: كيف تنقبض العضلات في الجسم؟

أشار التقدُّم الحادث في علوم المجهر مجددًا إلى إجابة هذا السؤال بالكشف عن وجود أشرطة ثخينة في الألياف العضلية، يُعتقَد أنها ناتجة عن وجود مواد لها كثافات مختلفة. وبدءًا من أواخر ثلاثينيات القرن التاسع عشر، أجرى ويليام بومان — وهو جراح وعالم تشريح إنجليزي — دراسة تفصيلية عن التركيبة المجهرية للعضلات الهيكلية لأكثر من ٤٠ نوعًا من الأنواع الحيوانية، متضمنة البشر وغيرهم من الثدييات، والطيور، والزواحف، والبرمائيات، والأسماك، والقشريات، والحشرات. كانت جميع الألياف العضلية تبدو تحت المجهر مخططة في شكل عُقَل أو قسيمات عضلية؛ تلك التي وصفها لوفنهوك قبل ذلك بـ ١٦٠ عامًا. ولكن لاحظ بومان داخل كل قسيم عضلي وجود أشرطة مخططة أخرى أكثر دقة، تتبادل في درجة لونها بين الباهت والقاتم. وأثناء الانقباض، تقصر القسيمات العضلية، باستثناء الأشرطة الأفتح لونًا؛ مما يسبب ما أسماه بومان «موجة قاتمة من الانقباض». واستنتج محقًّا أن «الانقباضية تكمن في العُقَل المفردة» (انظر الشكل ٦-١).

ولكن خلاف ذلك، نكص بومان عن اكتشافاته. فقد رأى أن الأعصاب داخل العضلة لم تتفاعل مباشرةً مع القسيمات العضلية مطلقًا؛ لذا يتحتَّم أن يكون بدء التنبيه الكهربائي غير مباشر على الأقل. والأسوأ من هذا أنه كان قلقًا فيما يتعلق بالعضلات الملساء، التي تُوجَد ضمن العضلات العاصرة وفي الشرايين. فهي غير مخططة؛ أي خالية من الأشرطة التي تُميِّز العضلات الهيكلية تمامًا، إلا أنها يمكن أن تنقبض بشكل جيِّد تمامًا أيضًا. وتبعًا لذلك ظنَّ بومان أن تلك النظرية لا علاقة لها بالانقباض العضلي إلا قليلًا، وأنَّ سر الانقباضية يكمن بالضرورة في البنية غير المرئية للجزيئات التي ظنَّ أيضًا أنها ستبقى إلى الأبد بعيدة المنال عن الحواس. وقد كان محقًّا فيما يخص أهمية التركيبة الجزيئية، ولكنه كان مخطئًا فيما يخص الأشرطة، وكذلك ما قاله عن الحواس بالتأكيد. ولكن أوصاف بومان للبنية العضلية شاركه فيها كل من جاءوا بعده تقريبًا.

ويمكن أن نقول بشكل ما إن من عاشوا في العصر الفيكتوري عرفوا الكثير ولم يعرفوا شيئًا في الوقت نفسه! فلقد عرفوا أن العضلات تتكوَّن من آلاف الألياف، وكلًّا منها ينقسم إلى عُقَل أو قسيمات عضلية، وهذه القسيمات هي الوحدات الأساسية لعملية الانقباض. وعرفوا أن القسيمات مخططة إلى أشرطة بما يكشف عن وجود مواد لها كثافات مختلفة. وبعض العلماء على الأقل اشتبهوا في أن الأشرطة تتكوَّن من شعيرات تنزلق على بعضها البعض، وعرفوا أيضًا أن الانقباضات العضلية منشؤها كهربائي، وأن الكهربية تتولَّد بناء على فَرْق الجهد عَبْر الأسطح الداخلية، بل إنهم اشتبهوا مُحِقِّين في



شكل ٦-١: بنية العضلة الهيكلية، مبينة الخطوط والأشرطة المميزة للألياف العضلية. يمتد القسيم العضلي من كل خط أسود (يُسمَّى قرص Z) إلى الذي يليه. وداخل القسيم العضلي، تحتوي المناطق الأكثر قتامة (أشرطة A) على لييفات الميوسين المرتبطة بالأكتين، وتحتوي المناطق الفاتحة اللون (أشرطة I) على الأكتين، والمناطق البينية التي باللون الرمادي تحتوي على شعيرات الميوسين المرتبطة بخط M. حينما تنقبض العضلة تعمل جسور الميوسين المستعرضة على سحب شعيرات الأكتين في الشريط I تجاه الخط M، فيقصر طول القسيم العضلي؛ مما يؤدي إلى حدوث «موجة قاتمة» من الانقباض (بدءًا من الشريط A ساحبًا الشريط I تجاهه).

أن الكالسيوم عامل رئيسي للانقباض. كما عزلوا البروتين الأساسي من العضلة، وأسموه الميوسين Myosin — وهو مشتق من كلمة يونانية معناها «عضلة». ولكن الأسرار الجزيئية الأكثر عمقًا التي افترض بومان أنها بعيدة عن متناول الحواس، كانت بالتأكيد بعيدة عن متناول الفيكتوريين؛ فقد عرفوا بعض الأشياء عن مكونات العضلات ولكن لم يعرفوا شيئًا عن علاقاتها فيما بينها، ولا عن كيفية عملها جميعًا؛ فقد انتظرت هذه

المعلومات حلول الإنجازات المركزة الفعالة لعلوم القرن العشرين. ولكي نحاول إدراك الروعة الحقيقية للعضلات وكيف نشأت مكوناتها؛ يجب أن نترك الفيكتوريين ونلتفت إلى الجزيئات نفسها.

في جامعة كامبريدج عام ١٩٥٠ في وحدة علم الأحياء التركيبي الوليدة التابعة لمعمل كافندش، شهد تاريخ العلوم لحظة تاريخية؛ إذ اجتمع اثنان من علماء الفيزياء واثنان من علماء الكيمياء يعملون على تطوير تقنية من شأنها تغيير مسار علم الأحياء في النصف الثاني من القرن العشرين — تقنية التصوير البلوري بالأشعة السينية. إنه لعمل مرهق أن تركز على بلورات هندسية الشكل متكررة، وحتى في يومنا هذا يُعتَبَر هذا فنًّا رياضيًّا شاقًّا عند تطبيقه على الجزيئات البيولوجية الكروية.

كان ماكس بيرتس رئيسًا للفريق العلمي، وكان هو ونائبه جون كندرو أول من حدَّد تركيب البروتينات كبيرة الجزيئات مثل الهيموجلوبين والميوجلوبين ولم يستخدما سوى الأنماط التي استحدثاها حينما سلَّطا حزمة من الأشعة السينية؛ فتشتَّتَتْ بفعل ذرات تلك الجزيئات المتسلسلة شديدة التعقيد.[٣] ثم جاء فرانسيس كريك الذي لم يلبث أن لحق به العالم الأمريكي الشاب جيمس واطسون فيما بعد في تجارب أخرى؛ اللذان اشتهر عنهما أنهما طبَّقا نفس التقنية التي نتج عنها اكتشاف بنية الدي إن إيه. ولكن في عام ١٩٥٠ لم يكن الرجل الرابع هو واطسون بل شخصية غير معروفة نسبيًّا، للعالم الخارجي على الأقل، وهو العضو الوحيد من هذا الفريق الذي لم يَحْظَ بجائزة نوبل؛ هيو هكسلي. إلا أن هيو هكسلي كان يستحقها بالتأكيد؛ لأنه — أكثر من أيٍّ منهم — أظهر كيفية عمل العضلات على مستوى الروافع الجزيئية، وامتدت إنجازاته لنصف قرن بعدها. وقد كرَّمته الجمعية الملكية بلندن بأرقى جوائزها؛ وهي ميدالية كوبلي في عام ١٩٩٧. ولا يزال عند كتابتي لهذه السطور يعمل أستاذًا فخريًّا بجامعة برانديس بماساتشوستس الأمريكية، ولا يزال ينشر مؤلفاته وهو في سن ٨٣ عامًا.

إن جزءًا من قلة نصيب هكسلي هذا من الشهرة كان بسبب الخلط الذي حدث بسبب تشابه اسمه مع شخصية أخرى أكثر شهرة بكثير وهو أندرو هكسلي، الحاصل على جائزة نوبل، وحفيد مُرافق داروين الشهير تي إتش هكسلي. وقد حقَّق أندرو هكسلي شهرته في سنين ما بعد الحرب العالمية الثانية لدراساته عن التوصيل العصبي، قبل أن يحوِّل اهتمامه إلى العضلات في بدايات الخمسينيات، وصار هو كذلك شخصية رئيسية

في الأبحاث العضلية في العقود التالية. وقد توصَّل هيو وأندرو هكسلي — كلٌّ منهما على حدة — إلى نفس الاستنتاج، ونشرا نتائجهما في مجلة «نيتشر» بالاتفاق مع المجلة، على نفس الورقة، وجهًا وظهرًا، في عام ١٩٥٤. وقد افترض كلاهما ما صار يُعرَف باسم «نظرية الشعيرات المنزلقة». كان هيو هكسلي بصفة خاصة متمكِّنًا من التعامل مع تقنيتين قويتين ورائعتين هما التصوير البلوري بالأشعة السينية والمجهر الإلكتروني (وكان في العشرين من عمره فحسب في تلك الآونة). وقد كشف المزج بين التقنيتين عن نتائج رائعة، مبينًا الوظائف العضلية بتفاصيل أدق فأدق على مدى العقود التالية.

أمضى هيو هكسلي فترة الحرب مشتغلًا بالرادار. ولدى عودته ليكمل دراسته بجامعة كامبريدج بعد ذلك شعر مثل الكثيرين من دارسي الفيزياء من جيله، مدفوعًا بأهوال القنبلة الذرية، بالاضطرار إلى هجر الفيزياء وتحويل اهتمامه إلى شيء أقل استفزازًا من الناحيتين الأخلاقية والنفسية، وكأن ما فقدته الفيزياء من اهتمام يصب في صالح علم الأحياء. وحينما انضم هكسلي إلى مجموعة بيرتس الصغيرة عام ١٩٤٨ دُهِش لقلة ما وجده من معلومات لدى علماء الأحياء عن تركيبة العضلات ووظائفها؛ فآلى على نفسه أن يكافح حتى يضع الحق في نصابه ويصحِّح تلك الأوضاع. فأجرى تجاربه على سيقان الضفادع، كما فعل جلفاني قبله، ولكن كانت نتائجه الأولية مخيِّبة للآمال؛ إذ كانت الأنماط المستقاة من عضلات ضفادع التجارب تلك ضعيفة. ولكنه وجد بعد ذلك أن الضفادع البرية أفضل بكثير مما دفعه إلى خوض سلسلة من الرحلات بدراجته بجوار المستنقعات ليمسك بالضفادع قبل تناوله وجبة الإفطار. ومن تلك الضفادع البرية استمدَّ أنماطًا غنية بالتفاصيل مستخدمًا الأشعة السينية، وإن كانت غامضة في معناها. ومما يثير التعجب أن هكسلي في عام ١٩٥٢ واجه دوروثي هودجكين، وهي من رواد التصوير البلوري لدى امتحانه لنيل درجة الدكتوراه. وحينما قرأتْ رسالته تفتَّقَ ذهنها عن فكرة أن معطياته قد تُوحي بوجود الشعيرات المنزلقة وناقشَتْ هذا الأمر بحماس مع فرانسيس كريك، الذي قابلتْه مصادفةً على السلالم. ولكن هكسلي، متحليًا بروح الشباب القتالية، جادلها عن حقٍّ قائلًا إنها لم تقرأ قسم طرق البحث بعناية في رسالته كما يجب، وأن معطياته لا تدعم استنتاجها النظري. وبعد ذلك بعامين توصَّل هكسلي بنفسه — مستخدمًا صور المجهر الإلكتروني — إلى استنتاج مماثل، ولكنه صار مدعومًا بالتجربة العملية.

ولكن حينما رفض هكسلي أن يقفز إلى استنتاجات مبكرة، مؤجلًا اكتشافه لنظرية الشعيرات المنزلقة مدة عامين، كان محقًّا في اعتقاده المبكِّر أن الجمع بين التصوير

البلوري بالأشعة السينية واستخدام المجهر الإلكتروني له القدرة على الكشف عن التفاصيل الجزيئية للانقباض العضلي؛ فكلتا الوسيلتين لهما أوجه نقص. وعلى حد قول هكسلي: «إن استخدام المجهر الإلكتروني يعطي صورًا حقيقية ملموسة، ولكن بها جميع عيوب المصنوعات البشرية، بينما يعطي استخدام حيود الأشعة السينية معطيات حقيقية ولكن في شكل مبهم.» فأدرك ببصيرته أن عيوب إحدى التقنيتين يمكن التغلُّب عليها بقدرات التقنية الأخرى ومزاياها، والعكس بالعكس.

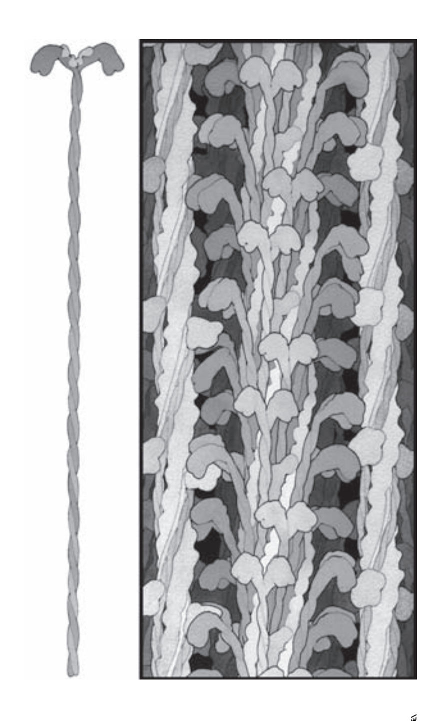
كان هكسلي محظوظًا كذلك؛ إذ لم يتمكَّن أحدٌ وقتها من التنبؤ بما سيتحقق من تقدُّم ملحوظ على مدى نصف القرن التالي، لا سيما في مجال التصوير البلوري بالأشعة السينية، ولم تكن ثمة صعوبة إلا فيما يتعلَّق بشدة حزمة الأشعة؛ فحصولك على نمط قابل للرصد عن طريق حيود الأشعة السينية (أو تشتتها) عَبْر بنية ما، يتطلب كمية كبيرة من الأشعة. وهذا إما أنه يستغرق وقتًا — قد يكون بالساعات أو حتى بالأيام، في ذلك الوقت المبكر من الخمسينيات، حينما كان هكسلي وآخرون منهمكين طوال الليل في إنعاش مصادر الأشعة السينية الضعيفة — أو أنه يتطلب مصدرًا متطرفًا في شدته، يمكنه إنتاج حزمة قوية من الأشعة السينية في لمحة سريعة. فعاد علماء الأحياء مجددًا إلى الاعتماد على ما تحقَّق من تقدُّم في علم الفيزياء، لا سيما استحداث ما يُسمَّى السنيكروترون، وهو معجل دوراني دون ذري يستخدم المجالات المغناطيسية والكهربية المتزامنة لتعجيل البروتونات أو الإلكترونات حتى تصل إلى سرعات فلكية، ثم إجراء تصادمات فيما بينها. وتكمن قيمة المعجل الدوراني التزامني لعلماء الأحياء فيما يُعتبَر تأثيرًا جانبيًّا منغصًا لعلماء الفيزياء. فمع حركة الجسيمات المستمرة في دوائرها الإجبارية، تطلق إشعاعًا كهرومغناطيسيًّا، أو ما يمكن تسميته «ضوء المعجل الدوراني التزامني»، وكثيرٌ منه يكون في نطاق الأشعة السينية. وهذه الحزم القوية بشكل مذهل يمكنها أن تولِّد أنماطًا حيودية في كسور قليلة من الثانية، وهي أنماط كانت تستغرق ساعات أو أيامًا في الخمسينيات لتُحدِث هذا التأثير. وكان هذا أمرًا مهمًّا؛ إذ إن وقائع الانقباض العضلي تتم خلال أجزاء من مائة جزء من الثانية. ومن ثم لا تكون دراسة التغيُّرات في التركيب الجزيئي التي تحدث أثناء الانقباض العضلي مجدية إلا باستخدام ضوء المعجل الدوراني التزامني.

وحينما وضع هكسلي نظرية الشعيرات المنزلقة، اضْطُر إلى أن يجعلها في شكل افتراض مبني على معطيات غير كافية إلى حدٍّ ما. ومع ذلك، فمنذ ذلك الحين وباستخدام

وسائل تدقيق لنفس التقنيات، تمَّ إثبات الكثير من التنبؤات الآلية التفصيلية على يد هكسلي وآخرين، مقاسة وصولًا إلى مستويات ذرية على مدى كسور من الثانية. وبينما لم يتمكَّن علماء العصر الفيكتوري من رؤية التراكيب المجهرية سوى إجمالًا، فقد تمكَّن هكسلي من تحديد الأنماط الجزيئية التفصيلية، ومن ثمَّ وضع افتراضاته للآلية العضلية. وفي يومنا هذا، وبالرغم من بقاء بضعة أمور غير محسومة، فإننا نعرف كيف تنقبض العضلة بدقة ذرية تقريبًا.

يعتمد الانقباض العضلي على خصائص جزيئين؛ هما: الأكتين، والميوسين. وكلاهما يتكوَّن من وحدات بروتينية متكررة تكوِّن شعيرات طويلة (بوليمرات). وتتكوَّن الشعيرات السميكة من الميوسين، الذي أطلق عليه الفيكتوريون هذا الاسم بالفعل، بينما تتكوَّن الشعيرات الرفيعة من الأكتين. وهذان النوعان من الشعيرات يتَّخذان شكل حزم جنبًا إلى جنب، ترتبط معًا بجسور مستعرضة عمودية دقيقة (كان هكسلي أول من شاهدها في الخمسينيات باستخدام المجهر الإلكتروني). وهذه الجسور ليست صلبة ولا عديمة الحركة، بل إنها تتأرجح، ومع كل حركة أرجحة تدفع شعيرات الأكتين قدمًا قليلًا، وكأنه طاقم سفينة طويلة يدفعون سفينتهم في البحر بالمجاديف. لكنها لا تشبه سفن الفايكنج تمامًا؛ إذ لا تستجيب ضربات المجاديف القوية لأمر واحد. إذ يبين المجهر الإلكتروني أن من بين الآلاف الكثيرة من الجسور المستعرضة، لا يقوم بحركة الجذب منها في انسجام إلا أقل من نصفها، بينما يكون أغلبها دائمًا في حالة فوضى حركية كحركة المجاديف المضطربة. إلا أن الحسابات تثبت أن هذه النقلات الدقيقة، حتى وإن كانت تعمل بعدم انسجام، تكون معًا قوية بدرجة تكفي لتحقق القوة الكلية للانقباضات العضلية.

كل هذه الجسور المستعرضة المتأرجحة تبرز من الشعيرة السميكة، فهي تشكل جزءًا من وحدات الميوسين الفرعية. على المستوى الجزيئي يُعتبَر الميوسين بروتينًا ضخم الجزيئات؛ فهو أكبر بثمانية أضعاف من جزيئات بروتينية متوسطة الحجم مثل الهيموجلوبين. أما عن الشكل العام فإن وحدة الميوسين تشبه الحيوان المنوي، أو بالأحرى تشبه حيوانين منويين يتقابلان معًا برأسيهما، بينما ينضفر ذيلاهما في تعانق قوي. ويتشابك الذيلان مع ذيول جزيئات الميوسين المجاورة في نظام مذهل؛ لتشكل معًا الشعيرة الكثيفة التي تشبه خيوط الحبل. وتبرز الرءوس من هذا الحبل بالتتابع، وهذه هي التي تكوِّن الجسور المستعرضة المتأرجحة التي تتفاعل مع شعيرة الأكتين (انظر الشكل ٦-٢).



شكل ٦-٢: الميوسين. نفَّذ الرسم ديفيد جودسيل بالألوان المائية الرائعة. إلى اليسار: جزيء واحد من الميوسين، برأسيه بالأعلى وذيليه مجدولين معًا. إلى اليمين: شعيرة ميوسين سميكة تبرز رءوسها لتتفاعل مع الأكتين على الجانبين، وتتضفر الذيول مثل الحبل لتكوِّن الشعيرة السميكة.

وفيما يلي شرح لكيفية عمل الجسور المتأرجحة. في البداية يرتبط الجسر المتأرجح بشعيرة الأكتين، وبمجرد أن يتم هذا يحدث ارتباط لمادة ثلاثي فوسفات الأدينوسين، التي تعمل بدورها على الإمداد بالطاقة اللازمة لتشغيل العملية برمتها، وبمجرد ارتباط ثلاثي فوسفات الأدينوسين ينفصل الجسر المتأرجح عن الشعيرة الرفيعة، وحينئذٍ يتأرجح الجسر المتحرر بزاوية حوالي ٧٠ درجة (من خلال منطقة «عنقية» مرنة) ثم يرتبط بشعيرة الأكتين مجددًا. وحالما يحدث هذا، تتحرر الفتات المستعملة من ثلاثي فوسفات الأدينوسين ويرتد الجسر المستعرض عائدًا إلى وضعه الأول. وهو في حركته هذه يعمل

كرافعة تسحب الشعيرة الرفيعة بكاملها، وهذه السلسلة الدورية من التحرر والأرجحة والارتباط والسحب تضاهي حركة الضرب بالمجداف، وفي كل مرة تتحرك الشعيرة الرفيعة بأجزاء قليلة من مليون جزء من المليمتر. وثلاثي فوسفات الأدينوسين مهم في هذه العملية؛ فبدونه لا يمكن أن يتحرر الرأس الميوسيني عن الأكتين ولا أن يتأرجح، والنتيجة هي حدوث تيبُّس، كما يحدث في حالة التيبس الرِّمِّي، حينما تتيبس العضلات بعد الموت بسبب نقص ثلاثي فوسفات الأدينوسين (ثم يزول التيبس بعد يوم أو نحو ذلك حينما يبدأ النسيج العضلي في التحلل).

وثمة أنماط مختلفة كثيرة من الجسر المتأرجح، وكلها متماثلة بصفة عامة ولكنها تختلف في سرعتها. وهي معًا بمنزلة «عائلة خارقة» تتكوَّن من آلاف الأفراد، ويُوجَد في البشر وحدهم حوالي أربعين من الأنماط المنفصلة. وتعتمد سرعة الانقباض وقوته على سرعة الميوسين؛ فالميوسين السريع يفكِّك ثلاثي فوسفات الأدينوسين سريعًا، ويدير دورة الانقباض بسرعة. كما يُوجَد عدد من الأنماط العضلية في كل فرد، وكلٌّ نمط له الميوسين الذي يخصه، بما له من سرعة انقباض تميِّزه.[٤] وهناك كذلك اختلافات مماثلة بين أنواع الكائنات. وأسرع الميوسينات جميعًا يُوجَد في العضلات المخصصة للطيران في حشرات مثل ذبابة الفاكهة التي يصل معدل دورتها إلى عدة مئات من المرات في الثانية الواحدة، وهو مستوى يزيد في سرعته كثيرًا عن أغلب أنواع الثدييات. وبصفة عامة تكون للحيوانات الصغيرة ميوسينات أسرع؛ ومن ثَمَّ تنقبض عضلات الفئران بمعدل أسرع من عضلات الإنسان بثلاثة أضعاف تقريبًا، أما السرعة بالنسبة للجرذان فهي أسرع بمعدل ضعفين مقارنةً بالإنسان. ويُوجَد أبطأ الميوسينات جميعًا في عضلات الحيوانات شديدة البطء كالكسلان والسلاحف. وفي هذه الحالة تكون سرعة تكسير الميوسين لثلاثي فوسفات الأدينوسين حوالي عشرين مرة أبطأ مما هي في البشر.

حتى وإن كان معدل استهلاك الميوسين لثلاثي فوسفات الأدينوسين هو ما يحدِّد السرعة التي تنقبض بها العضلات؛ فإن نضوب ثلاثي فوسفات الأدينوسين لا يعني أبدًا نهاية الانقباض العضلي. فلو حدث هذا النضوب لأنهينا جلسات التدريب في الصالات الرياضية في حالة من التيبس العضلي، تشابه التيبس الرِّمي، ونحتاج لأن نُحمَل على نقالة عائدين إلى البيت في كل مرة. ولكن الذي يحدث، بدلًا من هذا، أن العضلات تُصاب بالإجهاد، الذي يُفترَض أنه عملية تأقلم لمنع حدوث التيبُّس. ويعتمد بدء الانقباضات العضلية ونهايتها على مستوى الكالسيوم داخل الخلية، وهذا تحديدًا هو ما يربط

الانقباض العضلي بكهربية جلفاني الحيوانية؛ فحينما تَصِل النبضة المؤثرة (الآتية من الأعصاب) فإنها تنتشر سريعًا خلال شبكة من الأنيبيبات الدقيقة، التي تطلق أيونات من الكالسيوم إلى الخلية. ومن خلال عدد من الخطوات التي لا تعنينا في هذا المقام، يعمل الكالسيوم في نهاية الأمر على كشف المواقع التي ترتبط عندها الجسور المتأرجحة على شعيرة الأكتين، وهذا يمكِّن العضلة من الانقباض. وقبل أن تُغمَر الخلية العضلية بالكالسيوم تنغلق بوابات الفيضان وتنشط المضخات، فتسحب الزائد منه مجددًا، توطئةً للاستدعاء التالي للعمل. وحينما تتدنى مستويات الكالسيوم تتغطَّى مواقع الارتباط التي على شعيرة الأكتين مجددًا، ولا تتمكَّن الجسور المتأرجحة من الارتباط حينئذٍ ويتحتَّم على الانقباض أن يتوقَّف. وتضمن المرونة الطبيعية للقسيمات العضلية لها أن تعود إلى حالتها المسترخية الأصلية سريعًا.

هذه بالطبع نبذة مبسَّطة جدًّا، مع اختزال الأجزاء العاملة إلى ما يكاد يصل إلى حد أدنى مقتضب. ارجع إلى كتاب متخصص وستجد صفحات فيها تفاصيل عن البروتينات، مع شرح معتدل لدور كلٍّ منها من الناحيتين البنيوية والتنظيمية. إن الكيمياء الحيوية للعضلات معقَّدة بشكل هائل، ولكن يخرج من خلال التعقيد بصيص من نور التبسيط. وهذه البساطة ليست مجرد حيلة مساعدة، بل إنها أساسية في تطور النظم المعقدة؛ إذ تُوجَد في الأنسجة وأنواع الكائنات المختلفة طرق كثيرة للتحكم في ربط الميوسين بالأكتين. وكل هذه التفصيلات الكيميائية الحيوية تُذكِّرنا بزخارف الروكوكو في الكنائس القديمة من زمن فن الباروك؛ إذ يمكن اعتبار كل كنيسة منها تحفة فنية في حدِّ ذاتها، بالرغم من اعتبارها كنيسة من الناحية الدينية. وبالمثل، بالرغم من اختلافات الروكوكو في الوظيفة العضلية، فدائمًا يرتبط الميوسين بالأكتين عند نفس الموقع، كما يعطي ثلاثي فوسفات الأدينوسين الطاقة دائمًا للشعيرات العضلية المنزلقة.

ولنأخذ العضلات الملساء مثالًا، تلك العضلات التي أذهلت قُدْرَتُها على قبض العضلات العاصرة والشرايين ويليام بومان ومعاصريه من العصر الفيكتوري. تلك العضلات الملساء تفتقر إلى الخطوط التي تتميَّز بها العضلات الهيكلية، ومع هذا فإنها تعتمد على الميوسين والأكتين في انقباضها، وتتشكل شعيراتها بطريقة أكثر بساطة بكثير، فلا تنبئ عن أي نمط ميكروسكوبي معقد. كما أن التفاعلات بين الأكتين والميوسين تكون مبسطة فيها؛ إذ يحدث تدفق للكالسيوم لينشط رءوس الميوسين مباشرةً، خلافًا

للمسار الالتفافي الذي يحدث في العضلات الهيكلية. ومع ذلك، فمن النواحي الأخرى يكون انقباض العضلات الملساء مشابهًا للعضلات الهيكلية. ففي كلتا الحالتين ينتج الانقباض عن ارتباط الميوسين بالأكتين؛ ليدور في نفس الدورة التي يمنحها ثلاثي فوسفات الأدينوسين الطاقة اللازمة.

قد توحي هذه البساطة النسبية بأن العضلات الملساء هي خطوة على مسار تطوُّر العضلات الهيكلية؛ فالعضلات الملساء نسيج انقباضي يؤدِّي وظائفه بشكل جيِّد وبدرجة كافية بالرغم من افتقاره إلى بنية ميكروسكوبية معقدة، إلا أن هناك دراسات أُجريَتْ على بروتينات العضلات في أنواع مختلفة من الكائنات تظهر أن تطوُّر العضلات لم يكن بهذه البساطة التي قد يتصوَّرها البعض. من هذه الدراسات دراسة متأنية ومدققة أجراها عالمان في علم الوراثة، هما ساتوشي أووتا وناروبا سايتو من المعهد القومي لعلم الوراثة بمدينة ميشيما باليابان، وجدت أن نخبة من البروتينات في العضلات الهيكلية للثدييات تكون مماثلة لما يناظرها في عضلات الطيران المخططة في الحشرات لدرجة توحي بأن كليهما نشأ من سلف مشترك للفقاريات واللافقاريات كان يعيش منذ حوالي ٦٠٠ مليون سنة. وذلك السلف المشترك يُرجَّح أنه كانت فيه عضلات مخططة حتى وإن لم يكن يمتلك هيكلًا عظميًّا في جسمه. وينطبق قدر كبير من هذا نفسه على بروتينات العضلات الملساء، فهي أيضًا يمكن تتبُّع أصولها وصولًا إلى سلف مشترك مماثل؛ فالعضلات الملساء لم تكن مطلقًا خطوة على مسار تطوُّر العضلات الهيكلية الأكثر تعقيدًا، بل سلكت مسارًا تطوريًّا منفصلًا.

إنها حقيقة جديرة بالملاحظة: أن يكون الميوسين في عضلاتنا الهيكلية أكثر ارتباطًا بالميوسين المشتق من عضلات الطيران بتلك الذبابة المنزلية المزعجة التي تطن حول رأسك مما هو بالميوسين الذي في العضلات العاصرة التي تتحكم في عملية الإخراج في جسمك. ومما يثير الدهشة أن هذا الاختلاف يرجع إلى أبعد مما قد تتخيل، ويبدو أنه حتى يسبق نشوء خاصية التناظر الجانبي التي يتشارك فيها كل الحشرات والفقاريات. وفيما يبدو، فإن قنديل البحر لديه أيضًا عضلات مخططة يمكن مقارنتها مجهريًّا بعضلاتك. وهكذا فإن كلًّا من العضلات الملساء والعضلات المخططة ينقبضان باستخدام نظام متشابه من الأكتين والميوسين، ولكن كلًّا من النظامين على ما يظهر قد نشأ بشكل مستقل من سلف مشترك كان لديه كلا النوعين من الخلايا، وهذا السلف المشترك يُعَدُّ ضمن أقدم الحيوانات، من زمن تسيَّدت فيه قناديل البحر جميع الكائنات!

لكن بالرغم من هذا الاختلاف التطوري قديم الزمن لدرجة غير متوقعة بين العضلات المخططة والملساء، فمن الواضح أن جميع الأشكال التي لا حصر لها من الميوسين قد نشأت من سلف مشترك؛ فكلها تتشارك في نفس البنية الأساسية، وكلها ترتبط بالأكتين وبثلاثي فوسفات الأدينوسين عند نفس المواقع، وكلها تدور خلال نفس الدورة الحركية. وإذا كانت الميوسينات في كلٍّ من العضلات المخططة والملساء مشتقة من سلف مشترك، فيُرجَّح أن ذلك السلف كان أكثر بدائية من قنديل البحر، ويُرجَّح أنه لم يكن يمتلك عضلات مخططة ولا ملساء، إلا أنه كان يستفيد بشكل ما من الأكتين والميوسين. فما الذي كانت تفعله هاتان المادتان في ذلك السلف العتيق؟ الإجابة ليست جديدة، بل تعود إلى عقد الستينيات من القرن العشرين، ويمكن تحديدها في اكتشاف واحد غير متوقع. ولكن بالرغم من قِدَمها، فإن قلة من الاكتشافات في علم الأحياء ككلٍّ كانت لها قوة واضحة كتلك، بينما تفتح في الآن عينه نافذة على عملية نشوء العضلات وتطورها. فلقد وجد هيو هكسلي أن الأكتين يمكن «تزيينه» برءوس الميوسين وأن يُشاهَد بالمجهر الإلكتروني. دعني أفسر لك هذا.

يمكن استخراج جميع الشعيرات المختلفة من العضلات وتكسيرها إلى أجزائها المكونة لها. فرءوس الميوسين، على سبيل المثال، يمكن فصلها عن ذيولها الطويلة وإعادة ربطها بالأكتين في أنبوبة اختبار. وفي ضوء الظروف المناسبة يعيد الأكتين تشكيل نفسه سريعًا إلى شعيرات طويلة، فالبلمرة خاصية تُوجَد في صميم تكوين الأكتين. حينئذٍ تلتصق رءوس الميوسين بالشعيرات، كما يحدث تمامًا في العضلة السليمة، وتصطف مثل رءوس السهام الصغيرة جميعًا على طول الشعيرة. وكل رءوس السهام هذه تشير إلى نفس الاتجاه؛ مما يظهر قطبية الشعيرات الأكتينية. فهي دائمًا تتجمع في هيئة واحدة فحسب، ودائمًا ما يرتبط الميوسين في نفس الاتجاه، ومن ثم تتولَّد القوة العضلية. (وفي القسيمات العضلية ينعكس وضع هذه القطبية عند نقطة المنتصف، مع سحب كلتا النهايتين تجاه المنتصف؛ ومن ثمَّ يحدث انقباض لكل قسيم عضلي كوحدة واحدة. ويؤدي انقباض القسيمات العضلية المتتابعة إلى تقصير العضلة ككلٍّ.)

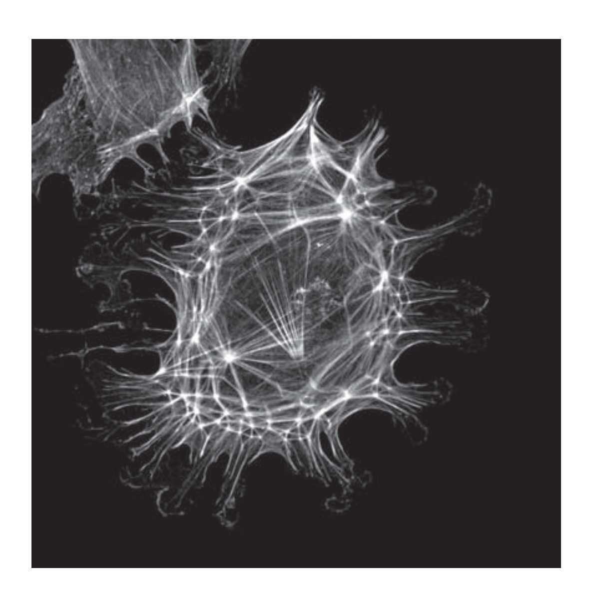
وترتبط رءوس السهام الصغيرة بالأكتين ولا شيء غيره؛ ومن ثم فإن إضافة رءوس الميوسين إلى الأنماط الخلوية الأخرى يعمل كاختبار لوجود شعيرات الأكتين. وقبل عقد الستينيات كان الكل يفترض أن الأكتين بروتين عضلي متخصص، يُوجَد بغير شك في عضلات أنواع الكائنات المختلفة، ولكن ليس في أنماط أخرى من الخلايا. وهذه الأفكار



شكل ٦-٣: شعيرات أكتينية مأخوذة من العفن الغروي من نوع «فيساروم بوليسيفالوم» مزينة برءوس سهام ميوسينية من عضلات أرنب.

القديمة اعترضتها معطيات كيميائية حيوية افترضت أن واحدًا من أكثر الكائنات تأكدًا من خلوه من العضلات — وهو خميرة البيرة — قد تحتوي على الأكتين، ولكن تلك الحيلة البسيطة بتزيين الأكتين برءوس السهام الميوسينية فتحت الباب للكشوف والإلهامات. وكان هكسلي أول من فتحه، بإضافة ميوسين الأرنب إلى شعيرات أكتينية مستخرجة من العفن الغروي، وهو كائن بدائي جدًّا، وتوصَّل بذلك إلى توافق مثالي (انظر الشكل ٦-٣).

وهكذا، فإن الأكتين يُوجَد في كل الأنحاء؛ بمعنى أن كل الخلايا المعقدة تحتوي على هيكل داخلي يُسمَّى «الهيكل الخلوي» يتشكَّل من شعيرات الأكتين (وغيره) (انظر الشكل ٦-٤). فجميع الخلايا في جسم الإنسان، فضلًا عن غيره من الحيوانات والنباتات والفطريات والطحالب والحيوانات الأولية، جميعها تحتوي على هيكل خلوي أكتيني. والحقيقة القائلة إن ميوسين الأرنب يرتبط بأكتين العفن الغروي تفترض ضمنًا أن



شكل ٦-٤: هيكل خلوي أكتيني في خلية غضروفية بقرية، موضحًا باستخدام صبغة مشعة تُسمَّى «فالويدين-إف آي تي سي».

شعيرات الأكتين في الأنماط المختلفة المتطرفة من الخلايا تكون متشابهة جدًّا في بنيتها التفصيلية. وهذا الافتراض صحيح تمامًا بشكل يثير الدهشة؛ لدرجة أننا نعرف الآن، على سبيل المثال، أن التسلسلات الجينية في أكتين كلٍّ من فطر الخميرة والإنسان متماثلة بنسبة ٩٥ بالمائة.[٥] ومن هذا المفهوم يبدو نشوء العضلات مختلفًا جدًّا؛ فنفس الشعيرات التي تقوِّي عضلاتك تقوِّي كذلك العالم المجهري لجميع الخلايا المعقدة. ويكمن الفارق الحقيقي الوحيد في تنظيمها.

في عالم الموسيقى، ثمة شيء أحبه للغاية في التنويعات. فحينما كان الموسيقار الألماني بيتهوفن شابًّا يافعًا يؤدي عزفًا أمام الموسيقار النمساوي موتسارت، يُقال إن موتسارت لم يُعجَب بعزفه بصفة خاصة، باستثناء مهارته في الارتجال؛ بمعنى قدرته على إصدار تقاسيم إيقاعية ولحنية منوَّعة من جملة موسيقية بسيطة. وفي مشوار حياته بعد ذلك،

وجدت موهبتُه تلك مَثَلَها الأعلى في التنويعات اللحنية الرائعة للموسيقار ديابلي. وكانت تنويعات بيتهوفن صارمة التكوين تمامًا مثل تنويعات مقطوعة جولدبرج الرائعة للموسيقار باخ الذي سبقهم. وقد حافظ على الخطة التناغمية الأساسية للحن كله؛ مما أكسبه ككلٍّ توحدًا وانسجامًا يمكن إدراكه فورًا وتقديره. وبعد بيتهوفن، هبط لدى الكثيرين مستوى هذه الدقة والصرامة، وغلب على الملحنين الموسيقيين تركيزهم على الحالات المزاجية والانطباعات، إلا أن موسيقاهم تفتقر إلى الحس الرياضي المتسم بالجلال والفخامة، وتفتقر إلى الشعور بأن كل فارق دقيق خفي في النغمات تم استخراجه، وكل بُعد سري جُعل واقعًا، وكل قدرة ممكنة تحققت.

هذه القدرة على صنع جملة موسيقية أساسية وعزف تنويعات لحنية يمكن إدراكها وتذوقها، مع الحرص دائمًا على إبقاء اللبنات البنائية للتركيبة الموسيقية، لها صدى يتوافق في علم الأحياء. فهناك جملة أو فكرة أساسية، وهي التفاعلات الحركية بين الميوسين والأكتين مثلًا، يتم تنويعها حسب التصور اللانهائي للانتقاء الطبيعي، وصولًا إلى نظام مذهل من حيث التركيب والوظيفة. ويُعتبَر العالم الداخلي لأي خلية معقدة دليلًا على هذه القدرة غير العادية على التنويع الدقيق.

التفاعلات بين البروتينات الحركية وشعيرات الهيكل الخلوي مسئولة عن عالم الحركة بكامله في الخلايا المعقدة؛ داخليًّا وخارجيًّا. هناك الكثير من الخلايا التي تنزلق زاحفة على سطح صلب دون جهد ملحوظ، ولا أطراف ضاربة، ولا التواءات وتمعجات جسمية. وهناك خلايا أخرى تكوِّن بروزات تُسمَّى الأقدام الكاذبة؛ وهذه تمتد ساحبة الخلية إلى الأمام، أو تبتلع فرائسها في ثنياتها البروتوبلازمية. وهناك خلايا أخرى لديها أهداب أو أسواط تعمل حركاتها الانثنائية المتموجة والإيقاعية على تحريك الخلايا هنا وهناك. وداخل الخلايا يدور السيتوبلازم محرِّكًا محتويات الخلية في حركة دائرية موجية مستمرة. وفي عالم الخلية الدقيق جدًّا، تسرع الأجسام الكبيرة نسبيًّا مثل الميتوكوندريا جيئةً وذهابًا، وتؤدي الكروموسومات رقصتها المهيبة ثم تنسحب إلى ركنيها المنفصلين. وسرعان ما تنقسم الخلية بعدها إلى اثنتين؛ بحدوث اختناق في منتصف الخلية وكأنه بفعل مشد خصر شديد الضيق. وكل هذه الحركات تعتمد على عدة أدوات جزيئية يكون فيها الأكتين والميوسين العنصرين النموذجيين. وتعتمد هذه الأمور كلها على تنويعات صارمة لجملة «موسيقية» واحدة.

وإذا استطعت أن تنكمش وتُصغِّر حجمَك إلى حجم جزيء من ثلاثي فوسفات الأدينوسين على سبيل المثال، فستجد الخلية كأنها مشهد لمدينة شاسعة من مدن المستقبل.

في جميع الاتجاهات تمتد مجموعة هائلة مذهلة من الكبلات، مدعومة بالمزيد أيضًا من الكبلات، بعضها يبدو رقيقًا ورفيعًا، بينما يبدو البعض الآخر سميكًا. في هذه المدينة الخلوية تكون الجاذبية بلا معنى، بينما تسود اللزوجة، وكذلك الذرات التي تهتز عشوائيًّا. حاوِلْ أن تتحرك وستجد نفسك عالقًا كأنك في وعاء من العسل، ولكنك في الوقت عينه تتعرض لصدمات عنيفة تجعلك تهتز من جميع الجهات. ثم فجأة وأنت في داخل هذه المدينة الصاخبة تأتي آلة مميزة تتحرك بسرعة مفزعة، بتقدم سريع متواصل، وبطريقة آلية مستخدمة واحدًا من الكبلات مسارًا لها. ويتصل بهذه الآلة المندفعة من خلال أداة وصل معقدة جسم شاسع حقًّا يتم جره بسرعة. إذا كنت في طريقها فستشعر كأنك ضُربت بمحطة طاقة طائرة. وهي حقًّا كذلك، فهذا هو الميتوكوندريون وهو في طريقه لتزويد الأشغال الرئيسية الموجودة في الجانب الآخر من المدينة بالطاقة. ثم ترى أجسامًا أخرى عديدة، تنطلق كلها في نفس الاتجاه، بعضها على نحوٍ سريع والبعض الآخر على نحوٍ بطيء، ولكنها جميعًا يتم جرها على طول تلك المسارات في السماء بآلات مشابهة. ثم فجأة! ... مع مرور الميتوكوندريون تجد نفسك أسير تيار يجعلك تدور في دوامة. لقد صرت الآن جزءًا من الدورة المستمرة التي تقلِّب محتويات جميع الخلايا المعقدة؛ إنه التيار السيتوبلازمي.

هذا وصف بالغ الصغر لكمٍّ هائل من التعقيد يصعب علينا للغاية استيعابه، ولكن بالرغم من غرابة هذه المدينة الكبيرة المستقبلية، لا بد أن يكون هناك شيء من الألفة في هذا الأمر. فهذا الوصف قد ينطبق على أي خلية من خلايا جسمك، أو خلية نبات أو فطر أو حيوان أولي وحيد الخلية يسبح في بركة قريبة منك. فإن هناك وحدة رائعة لعالم الخلايا تجعلك تحس بشعور عميق بالارتباط والانتماء للعالم الذي حولك. ومن وجهة نظر الخلية، فأنت مجرد تعديل آخر في خطة الجسم، أو مجرد وسيلة أخرى لبناء شيء رائع بلبنات متشابهة، ويا لها من لبنات! وتلك المدينة الكبيرة اللاهثة، أي الخلية المعقدة، التي تُوجَد في جميع حقيقيات النوى (كائنات تتكوَّن من خلايا معقدة بكل منها نواة؛ انظر: الفصل الرابع) تختلف عن العالم الأكثر بساطة بكثير الذي في داخل البكتيريا. وإن جانبًا كبيرًا من هذا الاختلاف يمكن أن يُعزى إلى وجود ذلك الهيكل الخلوي الرائع وحركته المرورية المستمرة التي تدير بلا كلل جميع محتويات الخلية. ودون تدفق تلك الحركة المرورية التي لا تتوقف ستكون المدينة الخلوية العظيمة مثل مدننا الكبيرة إذا خلت شوارعها من زحام المارة والسيارات.

وكل حركة المرور داخل الخلية يتولى أمرها محركات بروتينية تعمل بطريقة متشابهة بصفة عامة. أول هذه المحركات هو الميوسين الذي يشغِّل شعيرات الأكتين لأعلى وأسفل، تمامًا كما يفعل في العضلات. ولكن هنا تبدأ التنويعات والاختلافات؛ ففي العضلات تقضي رءوس الميوسين تسعة أعشار وقتها منفصلة عن شعيرات الأكتين، فإذا لم تفعل هذا وبقيت مرتبطة بها فسوف تسبب إعاقة مادية للرءوس الأخرى مانعة إياها من التأرجح، وسيكون هذا الأمر مثل سفينةٍ رفض مجدفوها أن يسحبوا مجاديفهم من الماء. وفي العضلات يعمل هذا النظام بشكل جيِّد لأن رءوس الميوسين تكون مجاورة لشعيرات الأكتين بذيولها الطويلة، التي تتضافر معًا في الشعيرة السميكة. ولكن بالنسبة لشعيرات الأكتين السلكية المعلقة، التي تجوب الخلية جيئةً وذهابًا، سيكون هذا النظام أكثر تسببًا للمشكلات. فما إن تنفصل المحركات عن الشعيرة، فإنها تُضرَب بعنف في هذا الاتجاه أو ذاك، وتناضل حتى تستعيد قبضتها (وإن كانت في بعض الحالات، تعمل التفاعلات الكهربائية على إبقاء تلك البروتينات الحركية مقيدة بالقرب من كبلاتها).

ويكون الحل الأمثل هنا هو المحرك «العملي»؛ وهو الذي يبقى متصلًا بسلك الأكتين بينما يتحرك (قائمًا بعمله) بطريقة ما على طوله، وهذا هو ما يحدث بالفعل. فبقليل من التغيرات في تركيبة الميوسين يتحول إلى محرك عملي، قادر على التحرك على طول شعيرة الأكتين دون أن يفلت قبضته. فما الذي تغير؟ أحد التغيرات هي إطالة العنق. كما تذكر فإنه في العضلة يكون ثمة تلاصق بين رأسي الميوسين؛ إذ يرتبطان ارتباطًا وثيقًا عن طريق ذيليهما وعنقيهما، وفيما عدا ذلك فلا يكون ثمة ارتباط قوي متبادل بينهما. فإذا حدثت إطالة للعنقين قليلًا جدًّا فسيحصل الرأسان على قَدْر من الاستقلالية. فيمكن أن يبقى أحد الرأسين مرتبطًا بينما يتأرجح الآخر؛ مما يتيح للمحرك أن يتقدَّم بسرعة وتواصل على طول السلك.[٦] وهناك أشكال أخرى من الميوسين تضم ثلاثة أو حتى أربعة رءوس بدلًا من رأسين فقط. وبطبيعة الحال، فإن الذيول يجب حينئذٍ أن تكون متحررة، فلا تنضفر معًا في شعيرة سميكة، وبهذا تكون رءوس الأكتين حرة الحركة. وفي النهاية ترتبط الأجسام الأخرى بالرءوس المحركة عن طريق بروتينات «قارنة»، واحد لكل صنف من «الحمولة». وتصبح النتيجة أن تكون لدينا مجموعة من المحركات العملية القادرة على تحريك «الحمولة» في الاتجاهات كافة في الخلية على مسارات الأكتين.

والسؤال الآن: من أين جاءت هذه المجموعة الرائعة من البروتينات الحركية؟ لا يُوجَد شيء يماثلها في عالم البكتيريا. كما أن الأكتين والميوسين ليسا مسببَي التحريك الوحيدين في

الخلايا حقيقية النوى، بل تُوجَد عائلة ثانية من البروتينات الحركية تُسمَّى الكينيزينات، ولكن الأسلاك العالية المرتبطة بها ليست أسلاك الأكتين الرفيعة، ولكن أنابيب أخرى أكبر سمكًا تُسمَّى الأنيبيبات الدقيقة، وهي تتركب من وحدات فرعية من بروتين يُسمَّى التيوبيولين. وتُعتبَر الكينيزينات مسئولة أيضًا، ضمن مهام أخرى كثيرة، عن الفصل بين الكروموسومات على مغزل من الأنيبيبات الدقيقة أثناء انقسام الخلية. وثمة أنماط أخرى من البروتين الحركي أيضًا ولكن لا حاجة بنا لأن نخوض في تفاصيل كثيرة عنها.

وجميع هذه البروتينات الحركية مع مساراتها السلكية العالية لها أسلاف في البكتيريا، وإن لم تكن هذه الأسلاف واضحة دائمًا؛ إذ إنها تمارس عادةً مهامًا مختلفة تمامًا.[٧] وهنا مجدَّدًا كشفت تقنية التصوير البلوري بالأشعة السينية عن وجود صلات قرابة ربما لم يكن من الممكن إدراكها بالتسلسلات الجينية وحدها.

على المستوى التفصيلي للتسلسلات الجينية، لا يُوجَد شيء مشترك تقريبًا بين النوعين الرئيسيين من البروتينات الحركية؛ وهما: الميوسينات، والكينيزينات. قد تُوجَد في هذا الموضع أو ذاك بعض نقاط التشابه، ولكنها اعتُبِرت لفترة طويلة مجرد مصادفة أو حالة من التطور المتقارب. وحقًّا لقد بدت الكينيزينات والميوسينات حالةً تقليديةً من التطور المتقارب؛ حيث يصير نوعان لا علاقة بينهما من البروتينات متخصصَيْن في أداء مهمة متماثلة. ومن ثم صارت البنية الأساسية لهما متشابهة، تمامًا كما نشأت أجنحة الخفافيش والطيور بصفة مستقلة بحيث وجدا حلولًا متشابهة للتحديات الشائعة للطيران.

وقد تمَّتْ معرفة التراكيب ثلاثية الأبعاد لتلك البروتينات باستخدام تقنية التصوير البلوري. ففي حين يعطي التسلسل الجيني تتابعًا ثنائي الأبعاد للحروف — مثل كلمات للأوبرا بدون موسيقى — يعطي التصوير البلوري طوبوغرافيا ثلاثية الأبعاد للبروتين، مثل أوبرا كاملة رائعة الجمال. وقد حدث ذات مرة أن قال الموسيقار الألماني فاجنر إن الموسيقى يجب أن تنشأ من الكلمات في الأوبرا؛ أي إن الكلمات يجب أن تأتي أولًا ويتم تركيب الموسيقى عليها. ولكن لا أحد يتذكر فاجنر لمشاعره التيوتونية (أي الألمانية العتيقة) الجياشة وحدها، ولكن موسيقاه هي التي عاشت لتسعد الأجيال التالية. وكذلك فإن التسلسل الجيني يضاهي الكلمة في الطبيعة، إلا أن الموسيقى الحقيقية للبروتينات تكون مختفية في أشكالها، وتلك الأشكال هي التي تعيش بالرغم من الانتقاء الطبيعي. فذلك الانتقاء لا تعنيه التسلسلات الجينية ولا بمثقال ذرة، ولكن تعنيه الوظيفة. ومع أن

الجينات هي التي تحدد الوظيفة، فغالبًا جدًّا ما يتم هذا عن طريق تحديد شكل البروتين، من خلال قواعد الطي أو الانثناء التي لا تزال لا يُعرَف عنها إلا القليل. ونتيجة لذلك، يمكن أن تنجرف التسلسلات الجينية المختلفة بعيدًا لدرجة تجعلها لا يحمل بعضها لبعض أي تماثل، كما في حالة الميوسينات والكينيزينات. إلا أن الموسيقى الأكثر عمقًا للكرات البروتينية ظلت باقية، وقد كشفت عنها تقنية التصوير البلوري.

وهكذا، على أساس التصوير البلوري، نعرف أن الميوسينات والكينيزينات تتشارك بالفعل في سلف مشترك، بالرغم من عدم تشاركهما في التسلسل الجيني إلا بالنزر اليسير. وتُظهر أشكالها ثلاثية الأبعاد نقاطًا كثيرة مشتركة من الانثناء والبنية، وصولًا إلى مستوى الأحماض الأمينية الحيوية المحفوظة في مواضعها في نفس الاتجاه، وهذا عمل فذ من أعمال الانتقاء يثير الدهشة؛ إذ تَمَّ حفظها بنفس الأنماط ونفس الأشكال، وفي نفس المواضع على مستوى ذري لمليارات السنين، بالرغم من تعرُّض مادتها، بل وتسلسلاتها الجينية، للتآكل بمرور الزمن. وتظهر هذه الأشكال أن كلًّا من الميوسينات والكينيزينات مرتبط بعائلة أكبر من البروتينات لديها أسلاف بكتيرية واضحة.[٨] وقد مارست هذه الأسلاف (ولا تزال تمارس) وظائف تضمنت شكلًا ما من الحركة وبذل الجهد والتحول عن أحد التوافقات إلى آخر، على سبيل المثال، ولكنها جميعًا لم تكن قادرة على الحركة الحقيقية. ويُظهر لنا التصوير البلوري الهيكلَ الداخلي للبنية البروتينية بنفس الطريقة التي تُظهر بها الأشعة السينية عند فحص جناح طائر ما هيكلَه العظمي. وكما تنم التراكيب العظمية والمفاصل عن أصول أجنحة الطيور، التي نشأت عن أطراف الزواحف غير القادرة على الطيران، فإن بنى البروتينات الحركية مشتقة من بروتينات قديمة كانت قادرة على التغيُّر التوافقي ولكن ليس على الحركة الحقيقية.

لقد منحتنا تقنية التصوير البلوري اكتشافات مبهرة بشأن نشأة وتطور الهيكل الخلوي أيضًا؛ تلك الأسلاك العالية المحلقة من الأكتين والتيوبيولين. وقد يسأل البعض: لماذا تنشأ لدى خلية ما شبكة من الأسلاك العالية ومسارات سريعة للبروتينات الحركية في غياب تلك البروتينات الحركية نفسها؟ ألا يكون هذا بمنزلة وضع للعربة أمام الحصان؟ والإجابة: إن هذا لا يكون صحيحًا إذا كان الهيكل الخلوي قيِّمًا في حدِّ ذاته. وتكمن قيمته في خصائصه البنيوية. يتم الحفاظ على أشكال جميع الخلايا حقيقية النوى — من الخلايا العصبية الطويلة والمغزلية إلى الخلايا الطلائية المسطحة — بفضل ألياف الهيكل الخلوي، وقد تبيَّن أن الكثير من هذا ينطبق أيضًا على البكتيريا. على مدى أجيال سابقة

كان علماء الأحياء يعزون الكثير من أشكال البكتيريا (كالعصوية واللولبية والهلالية … إلخ) إلى الجدر الخلوية الصلبة التي تحيط بالخلية. ومن ثم كانت مفاجأة في منتصف التسعينيات من القرن العشرين أن يكتشف العلماء أن للبكتيريا هيكلًا داخليًّا خلويًّا أيضًا، وهو يتكون من ألياف رفيعة تبدو إلى حد بعيد مثل الأكتين والتيوبيولين، وهي ألياف تعرف اليوم أنها مسئولة عن الحفاظ على الأشكال البكتيرية الأكثر تعقيدًا (يؤدي حدوث طفرات في الهيكل الخلوي إلى عودة تلك الأشكال البكتيرية المعقدة إلى أشكالها الكروية البسيطة).

وكما هو الحال بالنسبة للبروتينات الحركية، لا يُوجَد سوى القليل من التماثل الجيني بين البروتينات البكتيرية والبروتينات حقيقية النوى. إلا أن البنى ثلاثية الأبعاد التي فُحصت باستخدام التصوير البلوري في حوالي بدايات الألفية الحالية كانت أكثر إثارة للذهول حتى من البروتينات الحركية؛ فلقد وجد أن البنى البروتينية البكتيرية وحقيقية النوى تكاد تكون منطبقة بعضها على بعض. فلها نفس الأشكال، ونفس الفراغات، وقليل من نفس الأحماض الأمينية المهمة في نفس الأماكن. فمن الواضح أن هيكل الخلية حقيقية النواة نشأ من هيكل مشابه في البكتيريا. ومع حفظ الشكل تحفظ الوظيفة؛ فكلاهما يؤدي دورًا بنيويًّا واسعًا، ولكن في كلتا الحالتين، يكون هيكل الخلية قادرًا على أداء أكثر من مجرد الدعم الاستاتيكي. فهو ليس مثل هيكلنا العظمي الصلب، بل هو ديناميكي، يتغير ويُعاد تعديله بصفة مستمرة، فهو غير ثابت بل يتحرك دائمًا مثل سحب في يوم عاصف. ويمكنه بذل القوة وتحريك الكروموسومات هنا وهناك، وتقسيم الخلايا إلى نصفين أثناء التكاثر بالتضاعف، ويمكنه في حالة الخلايا حقيقية النوى — على الأقل — مد بروزات خلوية، بدون مساعدة من أي من البروتينات الحركية على الإطلاق. وبمختصر القول، يكون الهيكل الخلوي قابلًا للحركة ذاتيًّا. فكيف يحدث هذا؟

تتكوَّن شعيرات كلٍّ من الأكتين والتيوبيولين من وحدات بروتينية فرعية تترتب في سلاسل طويلة، أو بوليمرات. وهذه القدرة على البلمرة ليست شيئًا غير عادي؛ فالمواد البلاستيكية ما هي إلا بوليمرات تتركب من وحدات أساسية تتكرر في شكل سلاسل جزيئية مطوَّلة. أما الأمر غير العادي المتعلق بالهيكل الخلوي فهو أن بنيته تخضع لتوازن ديناميكي؛ بمعنى أنه يُوجَد اتزان يتغيَّر باستمرار بين وحدات تُضاف ووحدات تُحذَف، وبين

التبلمر وإزالة البلمرة. ونتيجة لهذا يُعاد تعديل الهيكل الخلوي باستمرار، بناءً وهدمًا. ولكن هنا مكمن السحر؛ إذ إن الوحدات البنائية تُضاف فقط عند أحد طرفي السلسلة البوليمرية وتنفصل من الطرف الآخر (وهي تتركب على بعضها البعض بشكل متناسب مثل قطع الليجو، أو بالأحرى، مثل كومة من كرات لعبة الريشة الطائرة) وهذا يمنح الهيكل الخلوي القدرة على توليد القوة، وإليك السبب.

فإذا كان المعدل الذي تتم به إضافة وحدات إلى أحد طرفي السلسلة مساويًا لمعدل انفصال الوحدات من الطرف الآخر، فإن البوليمر ككلٍّ يبقى طوله ثابتًا. وفي هذه الحالة تبدو السلسلة متحركة للأمام في الاتجاه الذي تُضاف عنده الوحدات الفرعية؛ فإذا وقف جسم ما في مسار السلسلة المتحركة، فإنه يمكن أن يُدفع ماديًّا للأمام. في واقع الأمر إنه لا يتم تحريكه للأمام بفعل السلسلة نفسها حقًّا، ولكن ما يحدث واقعيًّا هو أن ذلك الجسم يُضرَب بفعل اهتزاز القوى الجزيئية العشوائية؛ وفي كل مرة تنفتح ثغرة صغيرة بين الجسم ونهاية السلسلة النامية تتسلل وحدة فرعية إضافية وترتبط بالسلسلة. ويمنع امتداد السلسلة بهذه الطريقة حركة الجسم إلى الوراء، ومن ثم يميل الاهتزاز العشوائي لدفعه إلى الأمام.

ولعل أوضح مثال لهذا يمكن رؤيته في بعض حالات العدوى البكتيرية؛ حيث تُدمِّر البكتيريا بنية الهيكل الخلوي. فالليستيريا، على سبيل المثال، التي يمكن أن تسبب الالتهاب السحائي في الأطفال حديثي الولادة، تفرز اثنين أو ثلاثة من البروتينات التي تستولي معًا على الهيكل الخلوي لخلية العائل. ونتيجة لهذا تتحرك البكتيريا داخل الخلية المصابة بالعدوى، مدفوعة بطرف الأكتين الذي يُمثِّل «ذيل المذنب»، والذي يرتبط وينفصل وراء البكتيريا دافعًا إياها. ويُعتقَد أن هناك عملية مشابهة تحدث في البكتيريا نفسها لفصل الكروموسومات والبلازميدات (وهي دوائر صغيرة من الدي إن إيه) أثناء التكاثر الخلوي التضاعفي. وهناك شيء مشابه يحدث في الأميبا (بل وفي بعض الخلايا المناعية البشرية مثل الخلايا البلعمية الكبيرة)؛ إذ تتكوَّن البروزات الخلوية التي تُسمَّى الأقدام الكاذبة بقوة الدفع نتيجة لارتباط وانفصال شعيرات الأكتين نفسها، ولا حاجة هنا لأي بروتينات حركية معقدة مطلقًا.

قد تبدو الآلية الديناميكية للهيكل الخلوي كأنها السحر، ولكن يؤكد عالم الكيمياء الحيوية تيم ميتشيسون من جامعة هارفرد أن هذا أبعد ما يكون عن الحقيقة؛ فوراء ديناميكية الهيكل الخلوي عملية فيزيائية تلقائية تحدث دون الحاجة إلى عملية تطوُّر

عالية المستوى. فالبروتينات التي لا يكون لها دور بنيوي بأي حال يمكن أن تتبلمر فجأة دون سابق إنذار لتكوِّن هيكلًا خلويًّا كبيرًا، قادرًا على توليد القوة، ثم تتفكك بنفس السرعة لتعود إلى حالتها السابقة. قد يبدو هذا السلوك نذير شر، وحقًّا هو سلوك لا يلقى ترحيبًا من أغلب العلماء. ففي أنيميا الخلايا المنجلية على سبيل المثال تتبلمر صورة مختلفة من الهيموجلوبين فجأة إلى هيكل داخلي، ولكن هذا يحدث فقط حينما تكون مستويات الأكسجين منخفضة. ويؤدي هذا التغيُّر إلى تشويه خلايا الدم الحمراء إلى الشكل المنجلي الذي يعطي المرض اسمه، ومعنى هذا أنه يبذل قوة وحركة. وحينما ترتفع مستويات الأكسجين مجدَّدًا يتفكك هذا الهيكل غير الطبيعي تلقائيًّا — كما تكوَّن تلقائيًّا — فتعود الخلية إلى شكلها القرصي الطبيعي. إنه بحق هيكل خلوي ديناميكي مولِّد للقوة، بل لعله شيء عظيم الفائدة بحق.[٩]

ومن المرجح أن شيئًا مشابهًا قد حدث في حالة الهيكل الخلوي الأصلي منذ زمن بعيد؛ فوحدات ألياف الأكتين والتيوبيولين مشتقة أصلًا من بروتينات عادية كانت تمارس وظائف أخرى تتعلق بالخلية. وقد حدثت تغيُّرات طفيفة قليلة في بنيتها، كما يحدث في حالة الهيموجلوبين المتغير، مكنتها من أن تتشكل تلقائيًّا إلى شعيرات. ولكن من المرجح أن هذا التغير، خلافًا لأنيميا الخلايا المنجلية، كانت له فائدة فورية؛ إذ عضدته عملية الانتقاء الطبيعي. ويُحتمَل أن هذه الفائدة الفورية لم تكن مباشرة أو حتى متعلقة بالحركة. وفي الواقع إن تكوُّن هيموجلوبين الخلايا المنجلية يتم بالانتقاء الطبيعي (أي بشكل مقصود) في المناطق التي يتوطَّن بها مرض الملاريا؛ إذ إن وجود نسخة واحدة من الجين الشاذ يحمي من الملاريا. فمع أن التشكل التلقائي لهيكل خلوي غير مطلوب أصلًا يتسبب في حدوث نوبات مؤلمة وطويلة الأمد (لأن الخلايا المنجلية غير مرنة وتسد الشعيرات الدموية) فإن الانتقاء الطبيعي حافظ عليه ولم يمنعه؛ لأن له فائدة قيِّمة وغير مباشرة؛ إذ يمنع العدوى بطفيليات الملاريا.

وهكذا فإن روعة الحركة — منذ بداياتها الأولية، وحتى القوة الرائعة للعضلات الهيكلية — تعتمد على أنشطة عدد قليل من البروتينات وأشكالها المتغيرة بلا حصر. والمشكلة الباقية اليوم هي إزاحة كل هذه المتغيرات العجيبة للكشف عن الجملة الموسيقية الأصلية، أو اللحن البسيط الذي بدأ ذلك كله. ويُعتبَر هذا من أكثر مجالات البحث العلمي إثارةً للاهتمام والجدل اليوم؛ فذلك اللحن قد غنته أم جميع الخلايا حقيقية النوى من قبل؛ ربما منذ مليارَيْ عام. ومن الصعب استعادة أصداء الأنغام بعد تلك الحقبة

البعيدة، وليس من المعروف كيفية نشوء خاصية الحركة لدى أوائل الخلايا حقيقية النوى على التحقيق. ولا نعرف بشكل مؤكد ما إذا كان التعاون المشترك (أي التكافل والتكامل) بين الخلايا قد لعب دورًا مهمًّا كما شدد لين مارجوليس، أو ما إذا كان الهيكل الخلوي قد نشأ من جينات موجودة بالفعل في خلية العائل. وثمة بعض الألغاز المحيِّرة من شأنها حين تجد الإجابة أن تمدنا برؤية أوضح. ففي البكتيريا، على سبيل المثال، يتم فصل الكروموسومات بعضها عن بعض باستخدام شعيرات الأكتين، بينما يتحقَّق الشد الذي يقسم الخلايا أثناء التكاثر التضاعفي باستخدام الأنيبيبات الدقيقة من التيوبيولين. والعكس صحيح بالنسبة للخلايا حقيقية النوى؛ حيث تتكوَّن خيوط المغزل التي تفصل الكروموسومات أثناء انقسام الخلية من الأنيبيبات الدقيقة، بينما يتكوَّن «المشد» المنقبض الذي يقسم الخلية من الأكتين. وحين نعرف كيف ولماذا يحدث هذا الانعكاس الوظيفي سنحصل على فهم أفضل للتاريخ التفصيلي للحياة على الأرض.

إلا أن هذه التحديات الكبيرة أمام الباحثين تُعتبَر في الحقيقة تفاصيل ضمن صورة شاملة صارت الآن واضحة على نطاق واسع؛ فنحن نعرف الآن ماهية البروتينات التي منها نشأ الهيكل الخلوي ونشأت البروتينات الحركية. ولا يهم كثيرًا في إطار هذه الصورة الشاملة مصدر هذه البروتينات، سواء أكانت بكتيريا متكافلة أم خلية عائل؛ فكلاهما مصدر مقبول ظاهريًّا، وحينما نعرف الإجابة لن تنهار أسس علم الأحياء الحديث. وثمة حقيقة مؤكدة: فإذا كانت هناك كائنات حقيقية النوى تعوزها القدرة على التحرك هنا وهناك، وأن تبذل القوى باستخدام هيكل خلوي ديناميكي وبروتينات حركية، فمعنى هذا أنه ليس بالإمكان العثور عليها الآن؛ فلقد ماتت منذ دهور من الزمان، وكذلك ذريتها كلها. لقد كان سلف جميع حقيقيات النوى الحية متحركًا، ويُفترض أن قابلية الحركة جلبت معها مزايا كبيرة؛ ولذا يُحتمَل أن نشوء قابلية الحركة حقَّقَ تغييرًا أكبر من مجرد تعقيد الأنظمة البيئية على طول الزمان. فلربما ساعد هذا على تغيير وجه كوكبنا الأرضي، من عالم بسيط تسوده البكتيريا إلى ذلك العالم الزاهر والزاخر بعجائب الكائنات التي نراها اليوم.

الفصل السابع

الإبصار

نعمة حُرِم منها الكثيرون

إن حاسة البصر نعمة نادرة في الحياة. فلا تُوجَد أعين بالمعنى التقليدي، على الأقل في المملكة النباتية، فضلًا عن الفطريات والطحالب والبكتيريا. وحتى في المملكة الحيوانية لا تُعتبَر العيون من السمات الشائعة على الإطلاق. ويُقال إن هناك ثماني وثلاثين نموذجًا مختلفًا اختلافًا جوهريًّا من خطط بناء الجسم — ما تُسمَّى الشعبة — في عالم الحيوان، ولكن ليس منها سوى ستة فقط تمتلك عيونًا حقيقية. أما الباقي فقد عاش لمئات الملايين من السنين دون أن يتمكَّن من رؤية أي شيء على الإطلاق، ولم يعاقبها الانتقاء الطبيعي بشيء لافتقارها إلى تلك السمة.

وإذا وضعنا الفوائد التطورية للعيون في مقابل هذه الخلفية الصارمة فإنها تبدو ضخمة للعيان. ليست الشُّعَب كلها متساوية في العدد، وبعضها يَفُوق البعض الآخر. فالحبليات، على سبيل المثال، وهي الشعبة التي تضمُّنا نحن البشر وجميع الفقاريات الأخرى تحوي أكثر من ٤٠ ألف نوع، بينما لدى الرخويات، بما فيها البزاقات والقواقع والأخطبوطات ١٠٠ ألف نوع، وتضم المفصليات، بما فيها القشريات والعنكبيات والحشرات أكثر من مليون نوع، فهي تمثل ٨٠ بالمائة من جميع الأنواع الموصوفة. وعلى النقيض من هذه نجد أن أغلب الشُّعَب الأقل شهرة، بما فيها تلك الحيوانات غير المألوفة مثل الإسفنجيات والدوَّارات وبعض أنواع الديدان والهلاميات التي لا يكاد يعرفها سوى علماء الأحياء التقليديون المدربون تضم قليلًا من الأنواع نسبيًّا، عشرات أو مئات، بينما تضم «شعبة» الصفيحيات نوعًا واحدًا فقط. وإذا ضممنا جميع الأنواع الحيوانية معًا،

فسنجد أن ٩٥ بالمائة منها تمتلك أعينًا. وعلى هذا فإن ذلك العدد القليل من الشُّعَب الذي لديه أعين هو الذي يسود الحياة الحيوانية في عالم اليوم.

بطبيعة الحال، قد لا تكون هذه أكثر من محض مصادفة. فلعل هناك ميزات أخرى خفية لخطط الجسم في هذه الشُّعَب تحديدًا أغفلناها وليست لها علاقة بالعيون، ولكن هذا لا يبدو مرجحًا. إن نشوء العيون الحقيقية القادرة على الإبصار المكاني أو الشيئي، وليس مجرد الإدراك البسيط لوجود الضوء أو غيابه، يعطي جميع المظاهر الدالة على حدوث تطور تحولي. وقد ظهرت أول عيون حقيقية بشكل مفاجئ إلى حدٍّ ما في سجل الحفريات، ويعود زمانها إلى حوالي ٥٤٠ مليون عام، قرب بداية تلك الفترة المتفجرة الكبيرة من النشوء والتطور، التي تُسمَّى الانفجار الكمبري، حين ظهرت الحيوانات بدرجة هائلة وفجائية في سجل الحفريات وبتشعب هائل أيضًا. وهكذا، بعد أن بقيت الصخور صامتة عدة دهور، ظهرت جميع الشُّعَب المعاصرة من الحيوانات تقريبًا إلى الوجود بغير سابق إنذار.

ولم يكن التوافق اللصيق في الزمن بين تفجُّر الحياة الحيوانية في سجل الحفريات وبين نشوء العيون من قبيل المصادفة، وهذا أمر يكاد يكون مؤكدًا؛ إذ إن الإبصار المكاني يجعل هناك فارقًا في الحركة بين المفترسات وفرائسها بالضرورة، ويمكن أن يحتمل أن يكون هذا هو السبب في المَيْل إلى تكوُّن دروع سميكة لدى حيوانات العصر الكمبري، وفي الزيادة الكبيرة لاحتمالية الحفاظ على بقايا تلك الحيوانات كحفريات. وقد تبنَّى عالم الأحياء أندرو باركر، من متحف التاريخ الطبيعي بلندن، فرضية معقولة مفادها أن نشوء العيون هو ما رسم ملامح الانفجار الكمبري على ذلك النحو المسلي، بل والمثير للتساؤلات. سنبحث لاحقًا مسألة ما إذا كانت العيون قد نشأت بشكل مفاجئ (أو ما إذا كان سجل الحفريات مضللًا في هذا الصدد). أما الآن فدعنا نذكر فقط أن الإبصار يعطي معلومات عن العالم أكثر بكثير مما يمكن أن تعطيه حواس الشم أو السمع أو اللمس؛ فالأرض تسبح في بحر من الضوء، ويصعب جدًّا أن تتجنَّب أن يراك الآخرون. ويُعتبَر الكثير من أروع حالات التأقلم في الحياة ردَّ فعلٍ لرؤية الآخرين للكائن الحي، سواء أكان جلبًا للجنس أو التلقيح في حالة طائر الطاووس أو الزهرة، أو استعراضًا للدروع الضخمة في ديناصور الستيجوسوروس أو حرصًا على التخفِّي والتمويه كما في الحشرة العصوية. وتهتم مجتمعاتنا بصورتها بدرجة كبيرة، وهو ما يجعلني في غنى عن المزيد من الخوض في هذه النقطة.

وفضلًا عن المنفعة التي يجلبها نشوء الإبصار، فإنه يُعَدُّ رمزًا ثقافيًّا؛ ذلك لأن العينين تبدوان مثاليتين للغاية. فمنذ عصر داروين اعتُبِرَت العينان مثلًا أعلى يستحق التمجيد، وتحديًا قويًّا لمفهوم الانتقاء الطبيعي. فهل يمكن أن ينشأ شيء كامل ومثالي إلى هذه الدرجة بوسيلة تلقائية؟ يقول المتشككون في نظرية الانتقاء الطبيعي: ما فائدة النصف عين؟ إن الانتقاء الطبيعي للكائنات يقتضي إيجاد مليون تدرُّج، كلٌّ منه أفضل بالضرورة مما سبَقَه، أما البنية غير المكتملة فسوف يلفظها العالم بلا رحمة. ويستطرد المتشككون في تلك النظرية قائلين: ولكن العين مثالية كما الساعة؛ فلا يمكن اختزالها أو تبسيطها، فإذا أزلنا قليلًا من مكوناتها فلن تعمل. فالساعة بدون «رقاص» تكون معطلة، وكذلك العين بدون عدسة أو شبكية لا قيمة لها، أو هكذا قِيلَ لنا. فإذا كان النصف عين لا قيمة لها، فلا يمكن أن تكون العين قد نشأت بالانتقاء الطبيعي أو بأي وسيلة أخرى يعرفها علم الأحياء الحديث؛ ومن ثم يجب أن تكون دليلًا على التصميم السماوي.

تلك المجادلات القاسية الكثيرة عن الكمال في علم الأحياء نادرًا ما تفعل أكثر من ترسيخ أوضاع متصلبة بالفعل. ويعترض المدافعون عن داروين قائلين إن العين هي بالفعل بعيدة عن الكمال، وهذا يعرفه كل من يرتدي نظارة أو عدسات لاصقة أو من يفقد بصره. هذا صحيح لا شك، ولكن ثمة خطر يكتنف هذا النوع من الجدل النظري ويتمثل في أنه يتغاضى عن الكثير من التفاصيل الدقيقة الموجودة دون شك. خُذِ العين البشرية مثالًا. يُوجَد رأيٌ شائعٌ بين بعض الناس يزعم أن عيوب تصميم تلك العين عميقة جدًّا وأنها تُعَدُّ دليلًا جيِّدًا على الطريقة التي اتبعتها عملية النشوء والتطور — على حدِّ زعمهم — في التجميع العشوائي لتراكيب غير ملائمة وغير مخطط لها أعجزها نقصان ما لهذه العملية من بصيرة. وزعموا أن المهندس البشري يمكنه أن يقوم بعمل أفضل من هذا بكثير، بل إن الأخطبوط لديه عين أفضل. لكن هذا الزعم الظالم يغفل قاعدة يعرفها الكثيرون، وتُعرَف باسم القانون الثاني لليزلي أورجل، الذي يقول: إن التطور أكثر مهارة منك أيها الإنسان.

دَعْنا ندرس هذه الحالة باختصار. إنَّ لدى الأخطبوط عينًا تشبه عين الإنسان إلى حدٍّ بعيدٍ، عينًا أشبه بـ «الكاميرا»، بها عدسة واحدة من الأمام، وطبقة حساسة للضوء، أي الشبكية، من الخلف (وهي بمنزلة فيلم الكاميرا). ولأن آخر سلف تشاركنا فيه مع الأخطبوط كان على الأرجح نوعًا من الديدان الذي حُرِم من وجود عين حقيقية، فلا

بد أن عين الأخطبوط وعين الإنسان نشأتا بشكل مستقل وتفرقتا وسارت كلٌّ منهما في طريقها لأداء نفس المهمة. وهذا الاستدلال تدعمه المقارنة بين نوعَيِ العين؛ فكلٌّ منهما تتكوَّن من أنسجة مختلفة في الجنين وينتهي بها الأمر إلى تركيبة مجهرية منفصلة. تبدو تركيبة عين الأخطبوط كأنها أكثر منطقية؛ فالخلايا الحساسة للضوء في الشبكية تشير إلى الخارج تجاه الضوء، بينما تمر الألياف الخلوية العصبية إلى الخلف مباشرةً إلى المخ. وعند المقارنة، نجد أن شبكية الإنسان غالبًا ما يُقال إنها موضوعة على نحوٍ معكوس؛ وهو نسق يبدو ظاهريًّا غير مناسب. فبدلًا من أن تبرز الخلايا الحساسة للضوء إلى الأمام، نجدها تقبع في المؤخرة، مغطاة بالألياف الخلوية العصبية التي تمر إلى الأمام في مسار التفافي إلى المخ. فيجب على الضوء أن يمر خلال هذه الغابة من الأسلاك قبل أن يستطيع الوصول إلى الخلايا الحساسة للضوء، والأسوأ من هذا أن الأسلاك تشكل حزمة تخترق الشبكية متجهة إلى الوراء تحت اسم العصب البصري؛ تاركة بقعة عمياء عند نقطة الاختراق.[١]

لكن يجب ألا نتسرَّع فنغفل النسق الذي نحن عليه. وكما هو معتاد في علم الأحياء فإن الموقف أكثر تعقيدًا مما يبدو؛ فالأسلاك (أي الألياف العصبية) عديمة اللون، ومن ثم لا تعوق مرور الضوء كثيرًا، وحتى في وضعها هذا فهي تعمل «كعامل توجيه للموجات»؛ إذ تُوجِّه الضوء رأسيًّا نحو الخلايا الحساسة للضوء، مسببة بهذا أكبر استفادة بالفوتونات المتاحة. وربما كان الأهم من هذا أن لدينا ميزة انطمار الخلايا الحساسة للضوء مباشرةً في خلاياها الداعمة (الظِّهارَةُ المُصْطَبِغَةُ للشَّبَكِيَّة) مع وجود إمداد وفير بالدم مباشرةً من أسفل. وهذه المنظومة تدعم التحولات المستمرة للأصباغ الحساسة للضوء. وتستهلك الشبكية البشرية قدرًا من الأكسجين أكثر مما يستهلكه المخ لكل جرام من الوزن؛ مما يجعلها أنشط عضو في الجسم. ومن ثم تُعتبَر هذه المنظومة بالغة القيمة. وفي جميع الأحوال لا يمكن أن تتحمل عين الأخطبوط معدل الأيض المرتفع الذي في عين الإنسان، ولكنها ليست بحاجة إلى هذا على الأرجح؛ فالأخطبوط في معيشته تحت الماء في شدة إضاءة أقل قد لا يحتاج أن يُعِيد تدوير أصباغه الضوئية سريعًا.

ووجهة نظري أن هناك ميزات وعيوبًا في كل منظومة مادية في علم الأحياء، والنتيجة هي حالة توازن القوى الانتقائية التي قلَّما نقدرها. وهذه هي المشكلة عند بحث تلك القضايا الجزئية؛ فكثيرًا ما نرى نصف الصورة وحسب، ودائمًا ما تكون المجادلات المغرقة في الطبيعة المفاهيمية عرضة للهجوم اللفظي. وأنا، مثل أي عالم، أفضِّل أن أتبع

قطار المعطيات. وقد حدثت نهضة في علم الوراثة الجزيئية في العقود الأخيرة زودتنا بثروة من المعلومات التفصيلية التي تعطي إجابات شديدة التحديد عن أسئلة شديد التحديد. وحينما ننظم هذه الإجابات جميعًا معًا تنبثق رؤية قوية واضحة عن كيفية نشوء العين ومن أين نشأت: من سلف أخضر اللون وبعيد لدرجة تثير الدهشة. وفي هذا الفصل سوف نتبع هذا الخيط لنرى على وجه التحقيق فائدة النصف عين، وكيف نشأت عدسة العين وتطورت، ومن أين جاءت خلايا الشبكية الحساسة للضوء. وحينما نضم أجزاء هذه القصة معًا سنرى أن نشوء العينين قد غيَّر وتيرة التطور وتدفقه.

من السهل إجابة السؤال: «ما فائدة النصف عين؟!» بأسلوب تهكمي، فنسأل: أي نصف تقصد: الأيمن أم الأيسر؟! ويمكنني أن أتفهم الرد الخاطف اللاذع الذي أطلقه ريتشارد دوكينز حين قال إن النصف عين أفضل بنسبة ١ بالمائة من ٤٩ بالمائة من العين؛ ولكن من منظور الأشخاص الذين يجدون صعوبة في أن يستحضروا في أذهانهم صورة واضحة للنصف عين يكون تصور ٤٩ بالمائة من العين أمرًا أصعب. لكن في الواقع، يمثل مصطلح «النصف عين»، بالمعنى الحرفي، طريقة جيدة جدًّا لمعالجة المشكلة؛ فالعين، من وجهة النظر العلمية، تنقسم إلى نصفين بالتمام والكمال: أمامي، وخلفي. وكل من حضر مؤتمرات لعلماء طب العيون سيعلم أن أولئك العلماء يندرجون في شعبتين كبيرتين: الذين يتعاملون مع مقدمة العين (وهم جرَّاحو المياه البيضاء وعيوب النظر الانكسارية؛ أي الذين يتعاملون مع العدسة والقرنية)، والذين يتعاملون مع خلفية العين (أي الشبكية) فيعالجون الأسباب الرئيسية للعمى مثل الانحلال البقعي للشبكية. وتتفاعل الشعبتان على مضض، وفي بعض الأوقات تبدوان بالكاد كأنهما تتحدثان لغة واحدة، لكن لهذا التمايز ما يبرره. فإذا جُرِّدَتِ العين من جميع تجهيزاتها البصرية فإنها تُختزَل إلى شبكية مكشوفة؛ مجرد لوح حساس للضوء ولا شيء فوقه. وتُعَدُّ تلك الشبكية المكشوفة محور ارتكاز مؤكد للنشوء والتطور.

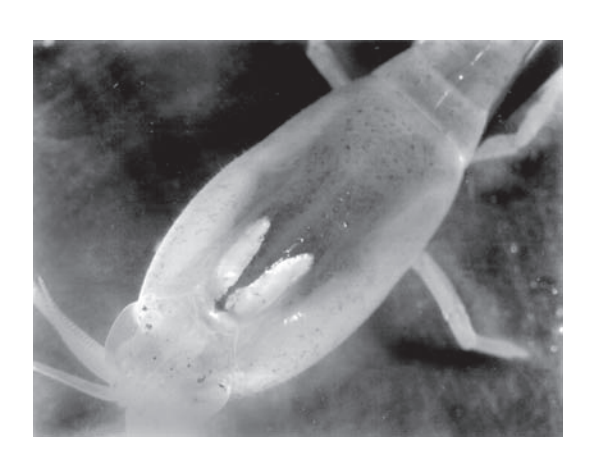
قد تبدو فكرة الشبكية المكشوفة غريبة، ولكنها تتلاءم بشكل ملائم للغاية مع بيئة غريبة بنفس الدرجة، وهي الفوهات الحرمائية المحيطية العميقة، تلك المداخن السوداء التي زرناها في الفصل الأول. تُعتبَر هذه الفوهات مقرًّا لمجموعة مدهشة من أشكال الحياة، وكلها تعتمد بطريقة أو بأخرى على البكتيريا التي تعيش مباشرةً على غاز كبريتيد الهيدروجين المنبعث من تلك الفوهات. ولعل أغرب تلك الأشكال وأكثرها

إثارة للاهتمام هي الديدان الأنبوبية العملاقة التي يَصِل طولها إلى ثماني أقدام. ومع أنها ذات صلة بعيدة بديدان الأرض العادية، فإنها كائنات عجيبة بلا قنوات هضمية، فلا أفواه لها ولا أمعاء، ولكنها تعتمد في بقائها على البكتيريا الكبريتية التي تعيش داخل أنسجتها. وثمة كائنات عملاقة أخرى تعيش في تلك الفوهات الحارة وتشمل رخويات ضخمة من البطلينوس وبلح البحر.

تُوجَد جميع هذه الكائنات العملاقة في المحيط الهادئ، إلا أن فوهات المحيط الأطلسي تحوي أيضًا عجائبها هي الأخرى، ومن أهمها نوع من الجمبري الذي يعيش حياة جماعية، واسمه العلمي «ريميكاريس إكسوكيولاتا»، ويتجمع في حشود كبيرة أسفل تلك المداخن. معنى الاسم العلمي حرفيًّا: «جمبري الصدوع الأعمى»؛ وهي تسمية غير مُوَفَّقة تدل على سوء تقدير من أطلقوها. بالتأكيد، كما هو متوقع من التسمية ومكان المعيشة في الأعماق المظلمة من المحيط الأطلسي فليس لدى ذلك الجمبري أعين تقليدية. فليست لديه السويقات العينية التي لدى أقربائه في الجمبري الذي يعيش في المناطق السطحية المضيئة، ولكن لديه قطعتان كبيرتان على ظهره، ومع أن منظر هاتين الرقعتين يصعب وصفه، فإنهما تعكسان الضوء كعينَي القط في أغوار المحيط العميقة التي يندر فيها الضوء.

أول من رصَدَ هاتين الرقعتين المستكشِفةُ سيندي فان دوفر، ويُعَدُّ اكتشافُها بدايةَ واحدةٍ من أبرز المسيرات العلمية في وقتنا الحالي. إن فان دوفر من نوعية المكتشفين العلميين الذين اعتاد كاتب الخيال العلمي الفرنسي جول فيرن أن يكتب عنهم؛ إذ يندر وجود أمثالها اليوم مثلما يندر وجود أنواع الحيوانات التي تدرسها. وترأس فان دوفر اليوم المعمل البحري بجامعة ديوك، وقد زارت جميع مناطق تلك الفوهات الحارة المعروفة أو أغلبها فضلًا عن القليل من المناطق التي لم تكن قد اكتُشِفَتْ بعد. وهي تُعَدُّ أول امرأة ترتاد أغوار مناطق «آلفين» البحرية العميقة. وقد اكتشفت فيما بعد أن نفس أنواع البطلينوس والديدان الأنبوبية العملاقة تستوطن المناطق الباردة بالقيعان البحرية، حيث يتسرب غاز الميثان من أعماق الأرض، وهذا يدل على أن الظروف الكيميائية، وليست الحرارة، هي القوة الدافعة وراء ازدهار الحياة في قاع البحر. ولكن في أواخر عقد الثمانينيات من القرن العشرين لم يكن أيٌّ من هذا قد حدث بَعْدُ، ولا بد أنها كانت تشعر بالارتعاد عند إرسالها عينات من الرقع الظهرية للجمبري الأعمى إلى أخصائي في عيون اللافقاريات، ومعها تساؤل ساذج يقول: هل يمكن أن تكون هذه

عينًا؟ فإذا اعتبرنا أن الشبكية هي أساس العين فإن الرد المقتضب يكون إن العين قد تبدو بهذا الشكل. فحتى إن كان الجمبري الأعمى محرومًا من المكونات المعتادة للعيون — العدسة والقزحية ... إلخ — فإنه يمتلك ما تبدوان كأنهما شبكيتان مكشوفتان تمتدان جزئيًّا على ظهره، بالرغم من معيشته في الأعماق المظلمة للمحيط (انظر الشكل ٧-١).



شكل ٧-١: الجمبري الأعمى ريميكاريس إكسوكيولاتا، وتظهر عليه الشبكيتان المكشوفتان، باهتتا اللون، اللتان تمتدان على الظهر طوليًّا.

ومع إجراء المزيد من الدراسات، كانت النتائج أفضل مما كانت تأمل فان دوفر. فقد تبيَّن أن الشبكيتين المكشوفتين بهما صبغ له خصائص مشابهة جدًّا لذلك المسئول عن إدراك الضوء في شبكية عين الإنسان، والذي يُسمَّى «رودوبسين». وفضلًا عن هذا، فإن هذا الصبغ يملأ الخلايا الحساسة للضوء المميزة لعيون الجمبري العادي، حتى وإن كان المظهر العام للشبكية مختلفًا جدًّا. ومن ثم فلعلَّ الجمبري الأعمى يستطيع بالفعل أن يرى الأشياء في قاع المحيط. أم هل الفوهات نفسها تنتج بريقًا خافتًا؟ هكذا تساءلت فان دوفر. على أي حال، فإن شعيرات المصباح الساخنة تتوهج، والفوهات المذكورة ساخنة وممتلئة بالمعادن المنصهرة.

لم يحدث قط أن تَمَّ إطفاء الأضواء عند الغطس في منطقة آلفين من قبل. ففي ذلك الظلام الدامس كان هذا الفعل من أشد صور الحماقة؛ إذ كانت هناك احتمالية كبيرة أن

تسقط المركبة في إحدى الفوهات الحارة وتُشوَى بمن فيها، أو تُدمَّر أدواتها على الأقل. لم تكن فان دوفر قد نزلت بعد في إحدى تلك الفوهات بنفسها، بل نجحت في إقناع العالم الجيولوجي جون ديلاني الذي كان على وشك أن يغامر بالنزول بإطفاء الأضواء وتوجيه كاميرا رقمية داخل إحدى الفوهات. صحيح أن الظلام كان دامسًا بالنسبة للعين المجردة، لكن ديلاني التقط بالكاميرا صورة لهالة محددة بوضوح حول الفوهة ووصفها بأنها «تحوم في الظلام مثل ابتسامة قط تشيشاير.» وحتى في هذه الحالة، فإن هذه الصورة المبكرة لم تُعْطِ تلميحًا لنوع الضوء الذي انبعث، ولا لون الأشياء ولا درجة إضاءتها. فهل يمكن حقًّا أن «يرى» الجمبري ضوء الفوهات بينما لا نستطيع نحن أن نرى شيئًا على الإطلاق؟

كان من المتوقَّع لتلك الفوهات المظلمة، المتوهجة مثل شعيرات المصباح الساخنة، أن تبرق بلون أحمر تصل أطواله الموجية إلى المدى الحراري (قرب الأشعة تحت الحمراء). ومن المفترض نظريًّا أن الأطوال الموجية الأقصر، في النطاقات الصفراء والخضراء والزرقاء من الطيف، يجب ألا تنبعث إطلاقًا. وقد تمَّ إثبات هذه الافتراضات ببعض القياسات المبكرة، وإن كانت غير دقيقة؛ حيث وُضِعَتْ مرشحات ملونة على عدسة الكاميرا. ومن المفترض أنه إذا كان الجمبري يمكنه أن يرى ضوء الفوهات، فستحتاج «عيناه» لأن تتكيَّفا لرؤية الضوء الأحمر أو ما قرب الأشعة تحت الحمراء. إلا أن أولى الدراسات على عينَي الجمبري افترضت غير ذلك. فعلى العكس، تحقَّقَ أكبر استثارة لمادة الرودوبسين الصبغية عن طريق الضوء الأخضر، بطول موجي حوالي ٥٠٠ نانومتر. ومع أنه من الممكن قبول هذه النتيجة باعتبارها نوعًا من الشذوذ الضوئي، فإن القراءات الكهربائية لشبكية الجمبري، بالرغم من شدة صعوبة الحصول عليها، أفادت كذلك أن الجمبري يمكنه فقط أن يرى الضوء الأخضر. وكان هذا أمرًا غريبًا بالفعل؛ فإذا كانت الفوهات تتوهَّج بلون أحمر، ولا يستطيع الجمبري أن يرى إلا الأخضر فإنه يكون فعليًّا أعمى. فهل كانت تلك الشبكيات المجردة الغريبة بلا وظيفة، ولعلها أعضاء مضمحلة مثل العيون العمياء لأسماك الكهوف المظلمة؟ وقد أوحت حقيقة أنها موجودة على ظهور الجمبري وليست في رءوسها بأنها لم تكن أعضاء أثرية مضمحلة، ولكن لم يكن ذلك بدليل حاسم.

ثم جاء الدليل مع اكتشاف يرقاتها. فليس عالم تلك الفوهات سرمديًّا كما قد يبدو، بل كثيرًا ما تهلك الكائنات الحية ببعض تلك الفوهات اختناقًا بسبب ما قد يتدفق فيها

من دخان أو غيره، فلا تزيد أعمارها عن أعمار البشر. وتنبثق فوهات جديدة في أماكن أخرى على قاع المحيط، وغالبًا ما تكون على بعد أميال كثيرة. ولكي تعيش الأنواع الحية بتلك الفوهات يجب أن تَعْبُر «الفجوة» الزمنية بين الموت والعيش قرب فوهات جديدة تعج بالحياة. وفي حين أن حركة معظم الحيوانات البالغة تعوقها عمليات تأقلمها مع أحوال الفوهات — ولتفكر فقط في تلك الديدان الأنبوبية العملاقة المحرومة من الفم والقناة الهضمية — فإن يرقاتها يمكن أن تنتشر بأعداد هائلة في مياه المحيط. وسواء أكانت اليرقات تعثر بالمصادفة على فوهات جديدة (بأن تنتشر بفعل تيارات المحيط العميقة) أو على أداة للاستقرار غير معروفة (باتباع التدرجات الكيميائية على سبيل المثال) فهذا موضع جدل ونقاش، ولكن الأشكال اليرقية ليست متأقلمة مع عالم الفوهات على الإطلاق. فهي تُوجَد في أغلب حياتها أقرب إلى سطح المحيط، وإن كانت لا تزال في عمقه، عند مستوى تتخلل فيه بعض أشعة الشمس المياه. وبتعبير آخر نقول إن اليرقات تعيش في عالم تكون فيه العيون مفيدة.

من بين أوائل اليرقات التي تَمَّ التعرُّف عليها، كانت يرقات نوع من سرطان البحر يحمل المسمى العلمي «بيثوجرايا ثرميدرون». ومما يثير الاهتمام أن السرطان البالغ من هذا النوع يشبه الجمبري البالغ الذي يستوطن تلك الفوهات في كونه يمتلك شبكيتين مكشوفتين بدلًا من العينين الكاملتين، ولكنه يختلف عن الجمبري في أن هاتين الشبكيتين تُوجَدان على رأسه في المكان الذي يُتوقَّع أن نجد العين عنده. ولكن كان الاكتشاف الأقوى أن يرقات ذلك النوع من السرطان كانت لها أعين، وهي أعين طبيعية، بالنسبة للسرطان على الأقل. ومن ثم، حينما كانت العيون مفيدة كانت للسرطانات عيون.

تبع ذلك اكتشاف العديد من اليرقات. تعيش أنواع عدة من جمبري الفوهات الحرمائية بجوار نوع ريميكاريس إكسوكيولاتا، ولكن يغفل العلماء عنها بسهولة، فهي كائنات تعيش مفردة وليست في جماعات كغيرها. وقد تبيَّن أنها تملك هي الأخرى شبكيات مكشوفة على رءوسها وليست ظهورها، وتشبه السرطان في أن يرقاتها لديها عيون طبيعية تمامًا. وفي الحقيقة إن آخر يرقات تمَّ التعرُّف عليها كانت يرقات الريميكاريس نفسه؛ وهذا يرجع جزئيًّا إلى أن تلك اليرقات تكون مشابهة — بشكل محيِّر — ليرقات الأنواع الأخرى من الجمبري، وجزئيًّا لأن لديها هي أيضًا أعينًا طبيعية تمامًا على رءوسها.

كان اكتشاف العيون العادية في اليرقات أمرًا مهمًّا للغاية. فمعناه أن الشبكية المكشوفة ليست مجرد عين مضمحلة، تمثل نهاية لأجيال من الخسارة، تؤدي وظيفة

متبقية تنسجم مع الحياة في الظلام الدامس. فللأشكال اليرقية عيون جيدة تمامًا وإذا كانت تفضل أن تفقدها أثناء نضجها، فهذا لا علاقة له بأجيال من الخسارة التطورية المستديمة؛ بل كان شيئًا متعمدًا، أيًّا كانت التكاليف أو الفوائد. ولنفس السبب، نقول إن الشبكية المكشوفة لم تتطوَّر من العدم، بالغة في تلك البيئة المظلمة درجة ضئيلة من الأداء الوظيفي لا يمكنها أن تنافس العين الكاملة التي تكوِّن صورًا حقيقية. بل ما يحدث أنه ما إن تصل اليرقات إلى طور البلوغ تهبط إلى تلك الفوهات وتندثر عيونها وتختفي تمامًا، بأن تُمتَصَّ أجزاؤها، خطوة بخطوة، ولا يتبقى بعد ذلك إلا الشبكيات المكشوفة. وفي حالة الجمبري من نوع ريميكاريس إكسوكيولاتا وحده تختفي العيون تمامًا، وتنمو الشبكيات المكشوفة من لا شيء على ظهورها. ويبدو، بصفة عامة، أن الشبكية المكشوفة أكثر فائدة من العين الكاملة في سلسلة من الحيوانات المختلفة؛ فهي ليست حالة فردية، ولا من المصادفات ... فلماذا؟

تكمن قيمة الشبكية المكشوفة في التوازن بين دقة الوضوح وبين الحساسية. وتعني دقة الوضوح: القدرة على رؤية (أو تبيُّن) تفاصيل الصورة. وهي تتحسن عند وجود العدسة والقرنية ... إلخ؛ إذ إن تلك التراكيب كلها تساعد في تركيز الضوء على الشبكية؛ لتكوين صورة واضحة. أما الحساسية فهي عملية عكسية؛ إذ تعني القدرة على إدراك الفوتونات الضوئية. فإذا كانت لدينا حساسية منخفضة فإننا نستخدم الضوء المتاح بدرجة ضئيلة. وفي حالتنا هذه يمكن أن تزداد حساسيتنا للضوء باتساع فتحة دخول الضوء إلى العين (حدقة العين) وزيادة عدد الخلايا الحساسة للضوء في الشبكية (الخلايا العصوية). وحتى في هذه الحالة فإن تلك الوسائل ليست بلا نهاية، والآليات الميكانيكية المطلوبة لتوضيح الصور ستحد في النهاية من درجة حساسيتنا للضوء. والطريقة الوحيدة لتحسين الحساسية وزيادتها تكون بفقدان العدسة وتوسيع حدقة العين بدرجة غير محدودة؛ مما يزيد من الزاوية التي يمكن بها للضوء أن يدخل العين. وستتمتع العين بأكبر فتحة على الإطلاق حين لا تُوجَد فتحة من الأساس؛ أي حين تكون الشبكية مكشوفة. وإذا أخذنا تلك العوامل في الحسبان، فبإجراء عملية حسابية بسيطة نكتشف أن الشبكية المكشوفة في جمبري الفوهات البالغ تزيد بمقدار ٧ ملايين مرة أو أكثر في حساسيتها عن العيون كاملة التكوين في يرقاتها.

وهكذا فإن الجمبري، من خلال التضحية بالقدرة على توضيح الصورة، يكتسب القدرة على اكتشاف المستويات شديدة الانخفاض من الضوء وأن يعرف، بدرجة ما،

من أين يأتي الضوء، على الأقل من أي جهة: من أعلى أو أسفل، من الخلف أو الأمام. هذه القدرة الرائعة على إدراك الضوء يمكن أن تكون فارقًا بين الحياة والموت في عالم يتقلَّب بين درجات حرارة عالية بما يكفي لشيِّ ذلك الجمبري في ثوانٍ معدودة، أو شديدة البرودة بما يهدد حياتها وبقاءها. وأتصوَّر أحد تلك الحيوانات وهو ينجرف إلى الفضاء الخارجي مثل رائد فضاء يَفْقِد اتصاله بسفينته الفضائية. وهذا قد يُفَسِّر السبب في أن لدى ذلك الجمبري من نوع ريميكاريس إكسوكيولاتا عينين على ظهره؛ إذ إنه يعيش في حشود على سلاسل الصخور التي أسفل الفوهات مباشرةً. ولا شكَّ أنه يكون في قمة ارتياحه حينما يلتقط الكمية المناسبة تمامًا من الضوء المصفَّى عَبْرَ الماء من أعلى لأسفل، حتى يصل إلى ظهره؛ إذ يكون رأسه مدفونًا تحت الأعداد الكبيرة المحتشدة من الجمبري. أما أقرباؤه الذين يعيشون متفرقين، فيكونون في وضع مختلف ظاهريًّا، فتُوجَد شبكياتهم المكشوفة على رءوسهم.

سنترك السؤال القائل: لماذا يرى الجمبري اللون الأخضر في عالم يَسُوده اللون الأحمر الخافت؟ إلى وقت آخر (علمًا بأنه لا يعاني العمى اللوني). أما الآن، فنقول بصفة أساسية إن النصف عين (وهي الشبكية المكشوفة) أفضل لذلك الحيوان من عين كاملة، على الأقل تحت ظروف معينة. ولسنا في حاجة إلى أن نؤكِّد على أفضلية وجود النصف عين تلك على عدم وجود عين على الإطلاق.

تُعتبَر تلك الشبكية المكشوفة البسيطة، التي هي بقعة كبيرة حساسة للضوء، في واقع الأمر نقطة انطلاق لأغلب المناقشات التي تدور حول نشوء العين وتطورها. بل إن داروين نفسه تخيَّل أن تلك العملية بدأت ببقعة حساسة للضوء. وكثيرًا ما يُستشهَد بكلامه على نحوٍ خارجٍ عن سياق الكلام عن موضوع العيون، ليس فقط من جانب الذين يرفضون تقبُّل فكرة الانتقاء الطبيعي باعتبارها واقعًا، ولكن حتى في بعض الأحيان من جانب علماء يتحرَّقون شوقًا من أجل «حل» مشكلة يُفترَض أنها حيَّرَتْ ذلك الرجل والعالم الكبير داروين. وهكذا كتب داروين — وهي المقولة التي يكثر الاستشهاد بها — يقول عن العين:

> فيما يخص افتراض أن العين بكل آلياتها الفذة الفريدة لضبط البؤرة من مسافات مختلفة، ولإدخال كميات مختلفة من الضوء، ولتصحيح الانحراف

الكروي أو اللوني للضوء، يمكن أن تكون قد تكوَّنَتْ بالانتقاء الطبيعي، فإنني أعترف ببساطة أن هذا كلام سخيف بشدة.

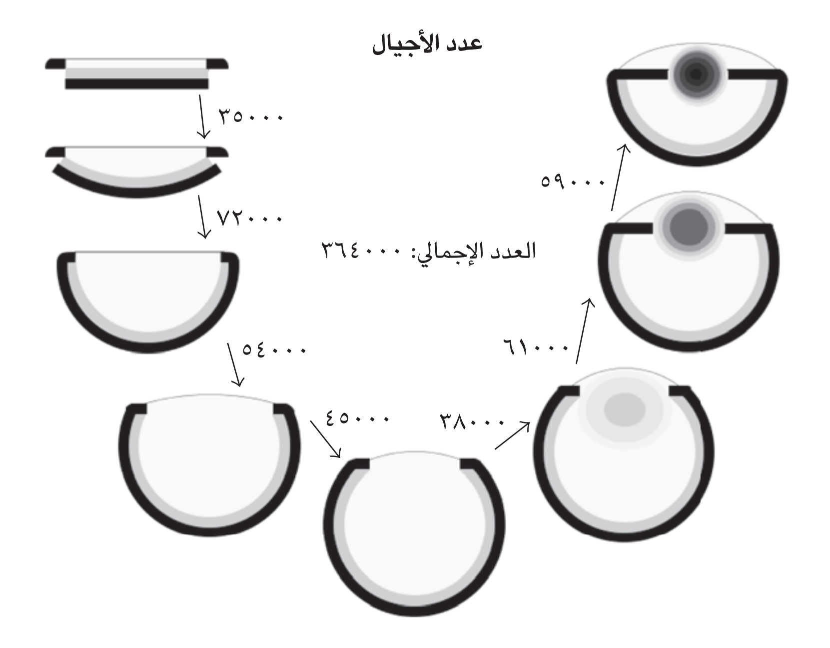
لكن الجملة التي كثيرًا ما يغفل عنها الناس هي الجملة التالية التي توضح بجلاء أن داروين لم يعتبر العين عقبة على الإطلاق:

> إلا أن المنطق يخبرني بأنه إذا كان من الممكن إظهار حدوث تدرجات ومراحل متعددة في تركيب العين بدءًا من مرحلة العين التامة معقدة التركيب وصولًا إلى العين الناقصة بسيطة التركيب — كل درجة منها مفيدة للحيوان الذي يمتلكها — إذا كانت العين تختلف حالاتها ولو إلى حد طفيف، وكانت هذه الحالات من الاختلاف يتم توارثها، وهو ما يحدث بالفعل، وإذا كان أي اختلاف أو تعديل في هذا العضو مفيدًا بأي حال لحيوان ما يخضع لظروف متغيرة من الحياة، ففي هذه الحالات جميعًا لا يكون من الصعب، بمعنى الكلمة، تصديق إمكانية أن تتكوَّن عين كاملة ومركبة بالانتقاء الطبيعي حتى وإن كان خيالنا عاجزًا عن تصوُّر ذلك.

وبألفاظ أكثر بساطة نقول: إذا كانت بعض الأعين أكثر تعقيدًا من أعين أخرى، وإذا كان من الممكن توارث الاختلافات في الإبصار العيني، وإذا كان ضعف الإبصار مضرًّا، فعلى حد قول داروين يمكن للعيون أن تتطوَّر. جميع هذه الظروف تحدث وتتحقق بكثرة؛ فما أكثر ما في العالم من عيون بسيطة وغير كاملة، بدءًا من البقع والنقر العينية التي تفتقر إلى وجود عدسة، إلى العيون الأكثر تعقيدًا التي تزدان ببعض، أو كل، الآليات الفذة والإمكانيات الفريدة التي تحدَّثَ عنها داروين! ومن المؤكد أن الإبصار العيني يختلف ويتفاوت، ويعرف هذا كلُّ من يرتدي نظارة، أو حتى من فَقَدَ إبصاره. ومن الواضح أننا نكون أكثر عرضة لأن يأكلنا أسد أو نمر، أو يصدمنا قطار أو سيارة، إذا لم نَرَ تلك الأشياء الخطيرة بأعيننا. وبطبيعة الحال، إن «الكمال» في هذه الدنيا أمر نسبي. فعَيْنَا النسر تزيدان في قوة الإبصار وتوضيح الصورة عن عينَيِ الإنسان، مع قدرة النسر على تبيُّن تفاصيل الأشياء من بُعد ميل، بينما تكون قوة إبصار الإنسان أفضل بمقدار ثمانين مرة من كثير من الحشرات، التي تكون الصورة لديها مشوشة كأنها لوحات من الفن الحديث.

أتصوَّر أن معظم الناس يتقبَّلون ما قاله داروين عن الظروف والأحوال دون تردُّد، لكن لا يزال من الصعب إدراك جميع المراحل البينية؛ فتخيُّل السلسلة المتصلة كلها يبدو أمرًا غير يسير، إن لم يكن مستحيلًا، وذلك بتعديل بسيط لكلمات الكاتب بي جي وودهاوس.[٢] وما لم تكن كل خطوة مفيدة في حدِّ ذاتها، فلا يمكن أن تتطوَّر العين المعقَّدة، كما رأينا. لكن في حقيقة الأمر تبيَّنَ أن التطوُّر التقدُّمي للعين يمكن استيعابه بسهولة. ولقد تم تصويره على هيئة سلسلة من الخطوات البسيطة، مبينة في الشكل ٧-٢، على يد عالمين سويديين؛ هما: دان إريك نيلسون، وسوزان بلجر. إن كل خطوة تُعتَبر تحسُّنًا؛ بدءًا من الشبكية المكشوفة وانتهاءً بعين مشابهة لعين السمكة ولا تختلف كثيرًا عن عين الإنسان. ويمكن بالطبع أن تتقدَّم لأكثر من هذا بكثير (وهذا يحدث فعلًا)، فيمكن أن تُضاف قزحية قادرة على توسيع حدقة العين أو انقباضها لتغيير كمية الضوء الداخل إلى العين، من ضوء النهار المبهر إلى غسق المساء. كما يمكن ربط بعض العضلات بعدسة العين لتغيير شكلها، فتُشَد أو ترتخي؛ مما يتيح للعين أن تنقل بؤرتها من نقطة قريبة إلى نقطة بعيدة (وهو ما يُسمَّى بالتكيُّف). ولكن هذه الأمور تُعتَبر لمسات دقيقة لا تُوجَد لدى الكثير من أنواع العيون، ولا يمكن أن نُضِيفها في رسم التصميم إلا لعين تُوجَد فيها هذه الأشياء بالفعل. ومن ثم فسوف نقنع في هذا الفصل بوجود تسلسل مشابه، من أجل تطوير عين عاملة مكونة للصور، حتى إن لم يسعفنا هذا التصور المبدئي بشأن العديد من الإضافات الاختيارية.[٣]

النقطة الحاسمة في هذا التسلسل هي أنه حتى أكثر العدسات العينية بدائية أو ضآلةً تكون أفضل من عدم وجود عدسة على الإطلاق (في مكان آخر غير المداخن السوداء بالطبع)، والصورة المشوشة أفضل من عدم وجود صورة. ونقول مجددًا إن ثمة مقايضة بين وضوح الصورة والحساسية للضوء؛ إذ يمكن تكوين صورة جيدة بشكل مثالي باستخدام كاميرا ذات ثقب دقيق، على سبيل المثال، بدون عدسة على الإطلاق. وحقًّا، تُوجَد عيون ذات ثقب دقيق في بعض أنواع الكائنات، ومن أوضح نماذجها حيوان بحري يُسمَّى «النوتي» وهو من الرأسقدميات الحية التي تمَّتْ بصلة قرابة لحيوان رخوي صدفي منقرض يُسمَّى الأمونيت.[٤] وتتمثَّل المشكلة بالنسبة لحيوان «النوتي» في الحساسية للضوء؛ إذ يتطلَّب الحصول على صورة حادة الوضوح وجود فتحة ضيقة لتقليل كمية الضوء الداخل للعين. وعند قلة الضوء، تكون الصورة مُعتِمة لدرجة تجعل من غير الممكن تمييزها عمليًّا. وهي بالضبط مشكلة ذلك الحيوان الذي يعيش في المياه



شكل ٧-٢: تسلسل الخطوات المطلوبة من أجل تطور العين، طبقًا لكل من دان إريك نيلسون وسوزان بلجر، مع عدد تقريبي للأجيال المطلوبة لحدوث كل تغيير. وإذا افترضنا أن كل جيل يستغرق عامًا واحدًا، فإن التسلسل الكامل يتطلب أقل قليلًا من نصف مليون عام.

العميقة المظلمة. وقد توصَّلَ عالم يُدْعَى مايكل لاند، وهو أحد كبار الخبراء البريطانيين في عيون الحيوانات بجامعة ساسكس إلى أن إضافة عدسة إلى عين لها نفس الحجم يجعلها أكثر حساسية بمقدار ٤٠٠ مرة، وأكثر توضيحًا للصورة بمقدار ١٠٠ مرة. ومن ثم، فهناك فائدة كبيرة تنجم عن أي خطوات تجاه تكوين عدسة من أي نوع، وهي فائدة تترجم فوريًّا إلى المزيد من فرص البقاء على قيد الحياة.

ويُرجَّح أن أول عدسة مكونة للصور «بشكل صحيح» نشأت كانت تنتمي إلى إحدى ثلاثيات الفصوص، وهي طائفة من المفصليات المنقرضة كانت تُغطِّي أجسامها دروع مصفحة تُذكِّرنا بفرسان العصور الوسطى، وكان الكثير من أنواع تلك الطائفة

يهيمن على البحار على مدى ٣٠٠ مليون عام. ظهرت أقدم عين في تلك الطائفة في أقدم حيوان معروف منها، ويعود إلى ٥٤٠ مليون عام مضى، قرب بداية «الانفجار» الكمبري، كما ذكرنا في بداية هذا الفصل. وبالرغم من كونها عيونًا متواضعة بالمقارنة بالروائع البصرية التي ظهرت بعدها بـ ٣٠ مليون عام. فقد أثار الظهور المفاجئ لتلك العيون لدى ثلاثيات الفصوص في سجل الحفريات تساؤلًا: هل يمكن حقًّا أن تكون العيون قد نشأت بهذه السرعة؟ وإذا كان الجواب نعم، فمن المرجح أن تكون حاسة الإبصار قد حفزت على حدوث الانفجار الكمبري، وذلك حسبما يذهب أندرو باركر. وإذا كان الجواب بالنفي، فلا بد أن تكون الأعين قد وُجِدَتْ في وقت سابق، لكن لسبب ما لم تدخل ضمن الحفريات. وإذا كان الأمر كذلك فلا يُعقَل أن يكون نشوء العيون قد دفع إلى حدوث الانفجار البيولوجي الكبير.

توحي أغلب الدلائل بأن الانفجار الكمبري حدث في وقته ذلك؛ لأن تغيُّر الأحوال البيئية سمح بالهروب من قيود الحجم. فالمرجح أن أسلاف حيوانات العصر الكمبري كانت صغيرة الحجم وتفتقر إلى أجزاء صلبة؛ مما يفسر قلة حفرياتها. كما منع هذا الأمر نشوء أعين مفيدة. ويتطلب الإبصار المكاني وجود عدسة كبيرة وشبكية متسعة ومخ قادر على تفسير ما يصله من إشارات، ومن ثم يمكن أن ينشأ فقط في الحيوانات التي تصل إلى حجم يكفي للوفاء بهذه الاحتياجات. ومن المرجَّح أن جانبًا كبيرًا من أجهزة الإبصار الأصلية مثل الشبكية المكشوفة والجهاز العصبي البدائي كان يُوجَد في حيوانات صغيرة عاشت قبل العصر الكمبري، ولكن في الغالب أُعِيقَ حدوث تطورات أخرى، بسبب صغر أحجام الحيوانات. كان الدافع المباشر لنشوء الحيوانات الكبيرة، على الأرجح، هو تزايد مستويات غاز الأكسجين في الهواء والبحار. فلا يمكن الحصول على الحجم الكبير ولا حدوث عملية الافتراس للفرائس إلا في وجود مستويات مرتفعة من الأكسجين (ولا شيء آخر غير الأكسجين يمكنه إتاحة الحصول على الطاقة الضرورية؛ انظر: الفصل الثالث). وقد وصل الأكسجين سريعًا إلى مستوياته المعاصرة قبل حلول العصر الكمبري بفترة قصيرة، في أعقاب سلسلة من تراكمات الجليد؛ بما يُعرَف باسم «الكرة الأرضية الثلجية». وفي هذه البيئة الجديدة المكهربة، المشحونة بالأكسجين، صار من الممكن ظهور الحيوانات الكبيرة التي تعيش على الافتراس لأول مرة في تاريخ الكوكب الأرضي.

كل هذا جميل، لكن لو لم تكن العيون الحقيقية موجودة قبل العصر الكمبري لبرز السؤال الذي ذكرناه، بقوة أكبر: هل يمكن حقًّا أن تكون العيون قد نشأت بهذه السرعة

بالانتقاء الطبيعي؟ فلم تكن ثمة عيون إطلاقًا منذ ٥٤٤ مليون سنة مضت ثم نشأت عيون تامة التكوين بعد ذلك بأربعة ملايين سنة. ظاهريًّا، تبدو الحفريات مناقضة للمتطلبات الداروينية الخاصة بضرورة حدوث مليون تدرج سلس، كلٌّ منها مفيد في حدِّ ذاته. لكن في واقع الأمر، يمكن تفسير المشكلة بدرجة كبيرة من خلال ما يحدث من تعارض في المقاييس الزمنية بين المدى المألوف للحياة والأجيال من ناحية وبين المرور الرتيب للعصور الجيولوجية من ناحية أخرى. فأي تغيُّر يحدث عَبْرَ مليون سنة إذا قسناه مقابل ما يمر من مئات الملايين من السنين في إيقاع رتيب فإنه يبدو كأنه حدث في عجالة سريعة، ولكنه لا يزال يُعتبَر زمنًا طويلًا بالغ الطول بالنسبة لما تعيشه الكائنات الحية. فكل ما لدينا من أجيال حديثة من الكلاب، على سبيل المثال، نشأت أصلًا من الذئاب وتطوَّرت، بمساعدة من البشر، في خلال واحد على مائة من ذلك الزمن.

من وجهة النظر الجيولوجية، حدث الانفجار الكمبري كغمضة عين؛ فيما لا يزيد على ملايين قليلة من السنين. ولكن من وجهة النظر التطورية يُعتبَر هذا الحدث زمنًا طويلًا، وحتى مدة نصف مليون عام من الزمن تُعتبَر أكثر مما يكفي لكي تنشأ عين وتتطور. وقد عكف العالمان نيلسون وبلجر، وهما يُقدِّمان فرضيتهما لتسلسل الخطوات (انظر الشكل ٧-٢) على حساب الزمن المطلوب. وقد افترضا على نحوٍ متحفظ أن كل خطوة لن تُحدِث سوى تغيير قَدْره ١ بالمائة فيما يتعلَّق بتلك التركيبة العينية بالذات، في صورة تعمُّق طفيف في كرة العين، أو تغيُّر طفيف في العدسة ... إلخ. وحينما أحصيا جميع الخطوات، صعقَا حينما وجدَا أن العين تحتاج إلى ٤٠٠ ألف تغيُّر محدد لكي تتطور من مرحلة الشبكية المكشوفة البدائية إلى العين مكتملة التكوين (وهذا الرقم لا يبتعد كثيرًا عن رقم المليون الذي طرحته ارتجالًا). ثم افترضَا أن التغيُّر الواحد يستغرق جيلًا واحدًا (وإن كان من الممكن بسهولة أن تحدث تغيرات عدة دفعة واحدة؛ مما يوضح أن التقدير المذكور متحفظ). وافترضَا في نهاية الأمر أن النوع العادي من الحيوانات البحرية الذي تَحْدُث فيه تلك التغيُّرات يُتوقَّع أن ينجب مرة واحدة في العام. وعلى هذا الأساس، استنتجا أن عينه تستغرق أقلَّ من نصف مليون عام حتى تتطوَّر إلى عين كاملة.[٥]

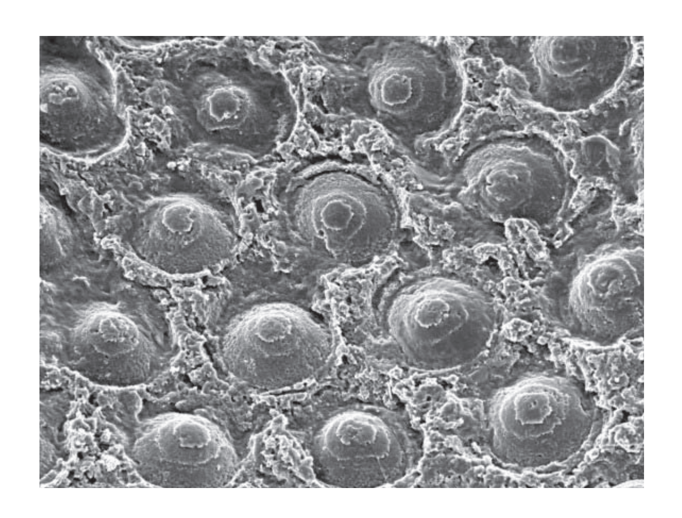
وإذا كانت جميع هذه الاعتبارات صحيحة، فإن نشوء العيون يُعتبَر حقًّا بمنزلة شرارة إطلاق للانفجار الكمبري. وإذا كان الأمر كذلك، فلا بد أن يُعَدَّ نشوء العين وتطوُّرها ضمن أهم الأحداث وأكثرها إثارةً في تاريخ الحياة على الأرض.

لكن ثمة خطوة تثير الارتباك في منظومة نيلسون وبلجر؛ وهي المرحلة الأولى في تطوُّر عدسة العين. فما إن تُوجَد العدسة البدائية، حتى يصبح من السهل أن ترى كيف يمكن أن يحدث الانتقاء الطبيعي تعديلًا وتحسينًا فيها، ولكن كيف تتجمَّع المكونات المطلوبة في المقام الأول؟ وإذا كانت الأجزاء والقطع المطلوبة لبناء عدسة العين لا فائدة منها في حد ذاتها، أفلا يجب أن تتخلَّص منها عملية الانتقاء الطبيعي جزافيًّا قبل أن تبدأ أعمال البناء؟ وهل يمكن أو يُحتمَل أن تفسر هذه الصعوبة السبب في أن حيوان النوتي لم يكن لديه عدسة عين مطلقًا، حتى وإن كان ممكنًا أن تكون مفيدة له؟

الواقع أن هذا السؤال ليس سؤالًا مشروعًا من الأساس، وفي وقتنا الحالي على الأقل يجب أن نعتبر حيوان النوتي بمنزلة أعجوبة فريدة لأسباب غير معروفة؛ إذ وجدت معظم الأنواع طرقًا ممهدة لذلك (ومنها أقرباء أحياء قريبون جدًّا من النوتي؛ مثل: الأخطبوط والحبار)، وبعضها كانت طرقه تلك إبداعية مذهلة. ومع أن العدسة تُعتبَر نسيجًا متخصصًا، فإن عملية تكوينها تتم بطريقة انتهازية، المرة تلو الأخرى؛ إذ تُجلَب لبناتها البنائية من أي مصدر في متناول اليد، من المعادن والبلورات إلى الإنزيمات، وحتى فتات الخلايا.[6]

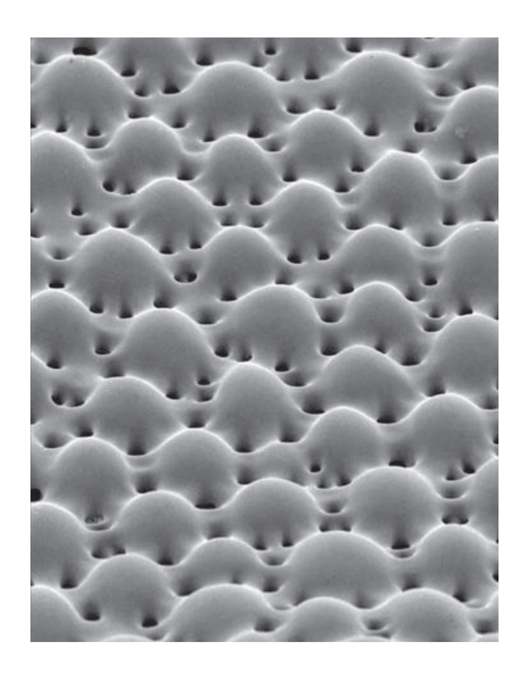
تُعَدُّ ثلاثيات الفصوص مثالًا ممتازًا لتلك الانتهازية، وقد تتعجب إذا عرفت أن عين الحيوان منها تحتوي بالفعل على قطعة حجر؛ إذ إن عدسات عيون ثلاثيات الفصوص تتكوَّن من البلور بالأساس، مادة الكالسيت المعدنية. والكالسيت هو اسم آخر لمادة كربونات الكالسيوم. والحجر الجيري صورة غير نقية من تلك المادة، أما الطباشير فهو صورة أكثر نقاوة بكثير. وتتكوَّن منحدرات دوفر الصخرية البيضاء من الكالسيت النقي تقريبًا، الذي يتخذ صورة بلورات دقيقة غير منتظمة تنتثر بخفة وبشكل عشوائي، بما يكسب الطباشير لونه الأبيض. وعلى العكس من هذا، إذا كانت بلورات الكالسيت تنمو ببطء (وهذا يحدث غالبًا في العروق الصخرية المعدنية) فيمكن أن يتخذ صورة تراكيب رائقة دقيقة شبه مكعبة تُعرَف باسم المعينات. ولتلك المعينات خاصية بصرية تثير الانتباه، وتنتج طبيعيًّا عن التشكل الهندسي للذرات المكونة لها؛ إذ تكسر الضوء من جميع الزوايا فيما عدا الضوء المحوري الساقط باستقامة وبدقة مرورًا بمنتصف البلورة. فإذا دخل الضوء عَبْر هذا المحور المميز، ويُسمَّى المحور سي، فإنه يمر باستقامة تامة لا يَعُوقه شيء، وكأنه مَلِكٌ يسيرُ على بساط أحمر. وقد تحوَّلَتْ هذه الظاهرة المثيرة إلى فائدة لصالح ثلاثيات الفصوص. فكلٌّ من السطيحات العينية العديدة التي لديها تستخدم

عدساتها الكالسيتية الدقيقة مستفيدة من المحور سي المفضَّل الذي ذكرناه آنفًا (انظر الشكل ٧-٣). ويمكن أن يمر الضوء من كل عدسة من اتجاه واحد فقط إلى الشبكية التي تحتها.



شكل ٧-٣: عدسات بلورية من إحدى ثلاثيات الفصوص من نوع «دالمانيتينا سوشياليس»، وُجِدَتْ في صخور أورودوفيشيا في بوهيميا بجمهورية التشيك تظهر تفاصيل السطح الداخلي للعدسات، ويبلغ عرض كلٍّ منها نصف مليمتر تقريبًا.

إن الكيفية التي نَمَتْ بها العدسات البلورية لدى ثلاثيات الفصوص — بحيث تصطفُّ في الاتجاه السليم — غير معروفة، ويُرجَّح أن تبقى كذلك؛ إذ إنها انقرضت في العصر البرمي، وقد هلك آخرها منذ ٢٥٠ مليون عام مضى. ولكن الواقع الذي يقول إن ثلاثيات الفصوص قد دخلت في غياهب الصمت بمرور تلك الأحقاب الزمنية لا يعني عدم وجود وسيلة لمعرفة كيفية نشوئها. وقد برز فجأةً دليلٌ جيِّدٌ من مصدر غير متوقَّع في عام ٢٠٠١. ويبدو أن عدسة عين ثلاثيات الفصوص ليست فريدة في نوعها كما كان يُظَنُّ سابقًا؛ إذ يُوجَد حيوان حي من نوع يُسمَّى النجم الهش، يستخدم العدسات الكالسيتية أيضًا للرؤية.



شكل ٧-٤: العدسات البلورية للنجم الهش من نوع «أوفيوكوما وندتيي» الموجودة على الصفيحات الهيكلية أعلى كل ذراع، التي بدورها تحمي المفاصل.

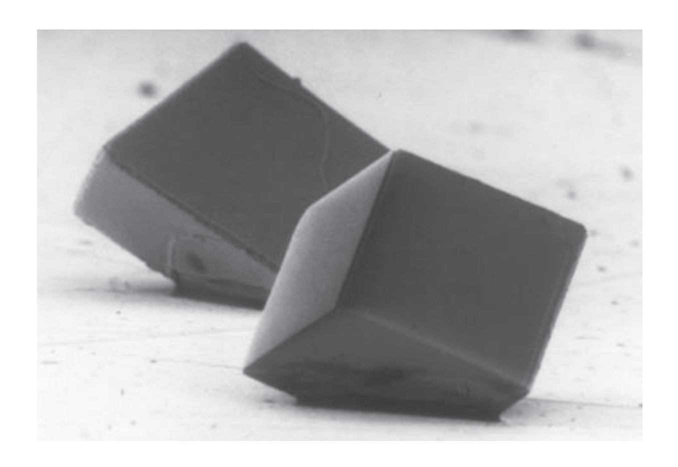
يُوجَد حوالي ألفَيْ نوع من النجوم الهشَّة، وكلٌّ منها لديه خمس أذرع مثل أبناء عمومتها من نجوم البحر. ولكن النجم الهش يختلف عن نجم البحر العادي في أن أذرعه رفيعة، طويلة، وتتدلى إلى أسفل، وتتكسَّر إذا رُفِعَتْ إلى أعلى (ومن ثمَّ جاءت التسمية). ولجميع النجوم الهشة هياكل صُنِعَتْ من صفيحات متشابكة من الكالسيت، وهذه تتكوَّن منها أيضًا أشواك على الأذرع تستخدمها في الإمساك بالفرائس. وأغلبها غير حساس للضوء، ولكن يُوجَد منها نوع يُسمَّى «أوفيوكوما وندتيي»، يربك من يلاحظه بأن يسعى سريعًا نحو الشقوق المظلمة على بعد متر إذا جاء حيوان مفترس. كانت المشكلة أن هذا النوع ليست لديه أعين، أو هكذا كان يُظَن، إلى أن لاحظ فريق بحثي من معامل بل وجود مجموعات من البروزات الكالسيتية على أذرعه تضاهي عدسات ثلاثيات الفصوص (انظر الشكل ٧-٤). وتمكَّنوا من إظهار أن هذه البروزات تعمل

بالفعل كعدسات عينية، تركز الضوء على خلايا حساسة للضوء تُوجَد تحت العدسات.[٧] فبالرغم من حرمان النجم الهش من وجود ما يمكن اعتباره مخًّا، فإن لديه عيونًا تؤدي وظيفتها. وعلى حدِّ قول مجلة «ناشونال جيوجرافيك»: «على نحوٍ غير متوقَّع من جانب الطبيعة، يملك البحر عيونًا في نجومه.»

فكيف تكوَّنَتْ عدسات النجم الهش؟ بالرغم من عدم معرفة الكثير من التفاصيل حتى الآن، فبصفة عامة نقول إنها تكوَّنَتْ بنفس الطريقة مثل غيرها من التراكيب البيولوجية ذات التكوين المعدني؛ مثل أشواك قنافذ البحر (مصنوعة أيضًا من الكالسيت). وتبدأ تلك العملية داخل الخلايا، حيث تتفاعل التركيزات العالية من أيونات الكالسيوم مع البروتينات؛ ومن ثم تربط هذه البروتينات في أوضاع ثابتة، وتُعَدُّ بمنزلة بذرة لتكوين البلورة، وذلك تمامًا مثلما كان الشخص المتفائل الواقف أمام متجر بقالة خاوٍ من البضائع في الاتحاد السوفييتي السابق يكوِّن نواةً لطابور متتابع. فمثلما يقف الشخص دون حِراك ويأتي آخرون من بعده ليقفوا إلى جواره، كذلك تثبُت الذرة في موضعها وتلتصق بها الذرات الأخرى.

وعلى نحوٍ يؤكد فكرة الاختزالية، إذا تمَّتْ تنقية البروتينات المسئولة عن بذر بلورات الكالسيت وفُرِشَتْ على فرخ من الورق، ثم وُضِعَتْ في محلول مُركَّز من كربونات الكالسيوم، فستتكوَّن بلورات مثالية على الورق، متشكلة بأشكال معينة مع اتجاه محور سي البصري الخاص بها باستقامة لأعلى، كما يحدث تمامًا لعدسة عين ثلاثيات الفصوص (انظر الشكل ٧-٥). بل إن ثمة تلميحًا لكيفية تكوُّنها في المقام الأول. ولا يهم كثيرًا انتقاء نوع البروتين بالضبط؛ فكل ما يهم فقط هو أن تكوُّن جزيئات البروتين محفوفة بسلاسل جانبية حمضية. وفي عام ١٩٩٢، أي قبل أن يعرف أي امرئ شيئًا عن عدسات النجوم الهشة بعقد كامل، قام عالمان متخصصان في علم المعادن الحيوية — هما ليا أدادي وستيفن واينر — بإنماء عدسات واضحة من الكالسيت على فرخ من الورق، مستخدمين بروتينات حمضية معزولة من أصداف حيوانات رخوية، بالتأكيد لا تستطيع الرؤية. وبتعبير آخر نقول إنه بالرغم من روعة هذه العملية، فإنها بالكامل تحدث تلقائيًّا حينما تمتزج بروتينات عادية بمعادن عادية. إنها رائعة بالتأكيد، ولكنها ليست أروع مما يحدث من عمليات تكوُّن طبيعية لمجموعات من البلورات الناتئة العجيبة التي تُوجَد في كهوف طبيعية؛ مثل كهف السيوف في المكسيك.

إلا أن تلك العيون البلورية بالرغم من حساسيتها للضوء، تُعتبَر عمياء من الناحية العملية. وتكمن الأهمية الحقيقية لعيون ثلاثيات الفصوص في قيمتها التاريخية، بوصفها



شكل ٧-٥: بلورات معينة من الكالسيت تنمو على ورقة فُرِشَتْ عليها بروتينات حمضية من أصداف حيوانات رخوية، ووُضِعَتْ في محلول مُركَّز من كربونات الكالسيوم. ويشير المحور سي البصري إلى أعلى باستقامة؛ وهو الاتجاه الوحيد الذي يمر الضوء عَبْرَه خلال البلورة دون أن يتشتَّت.

أول عيون حقيقية وليس في كونها أثرًا باقيًا من معالم النشوء والتطور. وقد تكوَّنَتْ أنماط أخرى من البلورات الطبيعية لتؤدي وظائف لدى كائنات أخرى، لا سيما الجوانين (إحدى اللبنات البنائية للدي إن إيه)، الذي يتبلور في شكل صفيحات يمكنها أن تركِّز الضوء في البؤرة. وتكسب بلورات الجوانين قشور السمك مظهرها اللوني الفضي، وتُضاف إلى الكثير من مستحضرات التجميل لنفس الغرض، لكنها تُوجَد أيضًا في الجوانو (ومنه اكتسبت اسمها)؛ وهي الفضلات الجافة للطيور والخفافيش. كما تعمل بلورات عضوية مشابهة كمرايا بيولوجية، ومعظم الناس يعرفونها؛ إذ تظهر على شكل عاكسات للضوء في عيون القطط. فهي تُحسِّن الرؤية الليلية عن طريق ردِّ الضوء وإعادته للشبكية، مانحة مستقبلات الضوء فرصة أخرى لالتقاط الفوتونات القليلة في عتمة الليل. وتُوجَد مرايا أخرى طبيعية تُركِّز الضوء على الشبكية لتكوين صورة حقيقية. وهذه تشمل العيون الجميلة المتعدِّدة لمحار الإسكالوب، التي تلوح من بين اللوامس الموجودة على حواف المحارة، وتستخدم مرايا مقعرة تحت الشبكية لتركيز الضوء. كما تعتمد العيون

المركبة لكثير من القشريات — بما فيها القريدس والجمبري وجراد البحر (الإستاكوزا) — على مرايا لتركيز الضوء، وتستخدم كذلك بلورات طبيعية على طول خطوط الجوانين.

لكن — بصفة عامة — فإن الدفعة الأساسية للنشوء والتطور، وأكبر أمجادهما، هي أن العدسات العينية تكوَّنَتْ من بروتينات متخصصة مثل التي لدينا. فهل هذه أيضًا تراكيب انتهازية تم ترقيعها معًا من مكونات موجودة بالفعل ولها استخدامات أخرى في الجسم؟ مع أنه أحيانًا ما يُفترَض أن النشوء والتطور علم تاريخي؛ ومن ثم لا يمكن إثباته بطريقة أو بأخرى، فإنه يمكن عن طريقه التوصُّل إلى توقُّعات محددة جدًّا يمكن اختبارها. وفي هذه الحالة تتوقع النظرية أن بروتينات العدسة يجب الحصول عليها وتوظيفها من بين البروتينات الموجودة بالفعل، التي لها استخدامات أخرى في الجسم، على أساس عدم إمكان نشوء بروتين متخصص للعدسة قبل وجود العدسة نفسها.

من الواضح أن عدسة عين الإنسان نسيج متخصص للغاية؛ فهي شفافة، خالية من الأوعية الدموية، وقد فقدَتْ خلاياها جميعَ خواصها تقريبًا، مكتفية بتركيز البروتينات في تجمُّع بلوريٍّ سائل، قادر على كسر الضوء لتكوين صورة واضحة على شبكية العين. وبطبيعة الحال، إن العدسة قادرة على تغيير شكلها لتغيير عمق المجال البصري. وعلاوة على هذا، فإن مدى انكسار الضوء بمروره خلال العدسة يتفاوت، متجنِّبًا عيوبًا مثل الانحراف (أو التشوُّه) الكروي (حيث يتم تركيز الضوء المار خلال مركز العدسة أو حافتها في نقاط بؤرية مختلفة). وفي ضوء كل تلك المعلومات، قد نخمِّن أن تكون البروتينات المطلوبة لتشكيل ذلك التجمع النقي من مادة العدسة فريدة في نوعها، ولها خصائص بصرية لا نجدها في البروتينات المعتادة في حياتنا اليومية، ولكننا إذا ظننا هذا فسنكون مخطئين تمامًا.

فالبروتينات التي تُوجَد في عدسة عين الإنسان تُسمَّى البلَّوْرينات (أو الكريستالينات)، وقد أُطلِق عليها هذا الاسم تبعًا لما كان يُظَنُّ من أن لها بالفعل خصائص فريدة تقتصر على عدسة العين. وهي تُشكِّل حوالي ٩٠ بالمائة من البروتينات الإجمالية في عدسة العين. ولأن العدسات تتشابه إلى حدٍّ بعيدٍ في أنواع الكائنات المختلفة، في مظهرها ووظيفتها، فيبدو من المعقول افتراض أن جميعها تتكوَّن من بروتين مشابه. ولكن حينما أُتِيحَتْ على نطاق واسع تقنيات حديثة لمقارنة تسلسل اللبنات البنائية في البروتينات المختلفة، بدءًا من بدايات عقد الثمانينيات من القرن الماضي، ظهرت الحقيقة المفاجئة. فالبلورينات ليست من البروتينات البنيوية (التركيبية)، بل إن أغلبها لا يقتصر

وجوده على عدسة العين بل يمارس أعمالًا أخرى في أماكن أخرى بالجسم. بل الأعجب في هذا، والأبعد عمَّا كان يُظَنُّ سابقًا، أن تبيَّنَ أن الكثير من البلورينات هي من الإنزيمات (أي المحفزات البيولوجية) التي لها وظائف طبيعية في «تسيير الأمور» في بعض الأماكن الأخرى في الجسم. وأكثر أنواع هذه البلورينات توافرًا في عدسة العين البشرية يُسمَّى ألفا-بلَّورين (ألفا-كريستالين) على سبيل المثال، وله صلة بأحد بروتينات التوتر؛ الذي اكتُشِف لأول مرة في ذبابة الفاكهة، ومن المعروف الآن أنه واسع الانتشار في الحيوانات. أما في البشر، فإنه يقوم بدور «الحارس الشخصي» للبروتينات الأخرى؛ بمعنى أنه يحميها من التلف. وبهذا الاعتبار، فإنه لا يُوجَد في العين فحسب، بل يُوجَد أيضًا في المخ والكبد والرئتين والطحال والأمعاء الدقيقة والجلد.

وقد تمَّتْ حتى الآن فهرسة أحد عشر نمطًا من البلورين، ويُوجَد منها ثلاثة فقط في عيون جميع الفقاريات، ويتفاوت الباقي من مجموعة لأخرى، بما يدل على أنها «وُظِّفَتْ» لتعمل في عدسة العين بشكل مستقل تمامًا، وهو الأمر المتوقع تمامًا من الانتقاء الطبيعي. لن نركز كثيرًا على أسماء هذه الإنزيمات أو وظائفها، ولكن من العجيب أن هذه المجموعة من البروتينات الأيضية التي يضطلع كلٌّ منها بمهمة محددة في الخلية قد أُخِذَتْ ودُفِعَتْ لأداء خدمة مختلفة بمعنى الكلمة. وكأن الجيش لم يُجَنِّد فيه سوى التجار وأعضاء نقابة العاملين بالتجارة والصناعة. ولكن أيًّا كانت الأسباب؛ فلا يُوجَد شيء يتعلَّق بهذه السياسة الشاذة يوحي بأن من الصعب تحديدًا تجنيد بروتينات عدسة العين.

وبصفة عامة، لا شيء يُمَيِّز بروتينات العدسة؛ فهي أُخِذَتْ من أماكن أخرى بالجسم ودُفِعَتْ لأداء المهمة المطلوبة منها. جميع البروتينات تقريبًا تتميَّز بأنها شفافة؛ ومن ثم لا يُعتبَر اللون مشكلة (والبروتينات التي تقترن بالأصباغ الطبيعية، مثل الهيموجلوبين، هي فقط التي تتميز بلون قوي خاص بها). ويمكن تحقيق تغييرات في الخصائص البصرية مثل درجة تحريف الضوء (أو ما يُسمَّى الانكسار) عند مروره بالعدسة ببساطة عن طريق تغيير تركيز البروتين، الأمر الذي يتطلَّب بالتأكيد الدقة والبراعة، ولكنه لا يُعَدُّ عقبة كئودًا. وليس معروفًا السبب في أن الكثير من البروتينات العدسية من الإنزيمات، إذا كان ثمة سبب لذلك من الأساس، ولكن أيًّا كان السبب، فإن البروتينات العدسية المتكوِّنة بشكلٍ مثاليٍّ لم تقفز إلى الوجود من الفراغ.

ثمة نافذة نفذت من خلالها كل تلك البروتينات إلى الوجود؛ وهي نوع من الحيوانات اللافقارية الدنيا التي تُعرَف باسم غير تقليدي هو «نفاخات البحر» (واسمه العلمي

المحدد هو «سيونا إنتستيناليس»؛ ومعناه الحرفي «عمود الأمعاء». ولم يكن نظام لينيوس رحيمًا عند منحه هذا الاسم). لا يفصح الطور البالغ من هذا الحيوان إلا عن القليل من صفات سلالته؛ فهو في الأساس في شكل كيس نصف شفاف يلتصق بإحدى الصخور، ولديه سيفونان متأرجحان أصفرَا اللون، يدخل من خلالهما الماء ويخرج. وتنتشر تلك الحيوانات في المياه الساحلية حول المملكة المتحدة، لدرجة أن البريطانيين يعتبرونها من الآفات. إلا أن يرقات تلك الحيوانات تفشي السر الدفين لهذا الحيوان، وتظهر أن هذا الحيوان أكثر بكثير من أن يكون مجرد آفة؛ إذ تبدو اليرقات قليلًا كحيوانات أبي ذنيبة (أفراخ الضفدع) ويمكنها السباحة هنا وهناك، مستفيدة من جهازها العصبي البدائي وعينين بدائيتين تخلوان من العدسات. وما إن تجد اليرقة مسكنًا مناسبًا، حتى تلصق نفسها بإحكام بتلك البقعة، ثم تقوم بامتصاص مخها الذي لم تَعُدْ تحتاجه (ويقول ستيف جونز متندرًا إن هذا عمل باهر يُثِير الكثير من الإعجاب لدى أساتذة علم الحيوان الجامعيين).

مع أن الطور البالغ من نفاخة البحر لا نعرف عنه أي صلة بالإنسان، فإن الطور اليرقي ذو صلة به؛ فنفاخة البحر حيوان حبلي بدائي بمعنى أن له حبلًا ظهريًّا، وهي المرحلة التطورية السابقة على الحبل الشوكي. وهذا الأمر يضعه في مصاف الفروع المبكرة للحبليات، ومن ثم جميع الفقاريات. وفي الواقع إنه انشق عن الفقاريات قبل نشوء عدسة العين، وهذا يعني أن هذا الحيوان قد يعطي فكرة عن كيفية تكوُّن عدسات عيون الفقاريات في المقام الأول.

وقد حدث هذا بالفعل. ففي عام ٢٠٠٥، وجد سباستيان شيميلد وزملاؤه بجامعة أكسفورد أن هذا الحيوان، بالرغم من افتقاره إلى عدسة عينية، فإن لديه بروتينًا سليمًا من البلورين، ليس في عينه، ولكن في مخه بعيدًا عن العين. لا نعلم تحديدًا ما يفعله في المخ، ولكن هذا لا يعنينا في هذا المقام. بل ما يعنينا هو أن نفس الجينات التي تتحكم في عملية تكوُّن عدسة العين في الفقاريات تتحكم أيضًا في نشاط هذا البروتين في نفاخة البحر؛ إذ يؤدي وظيفة في المخ كالتي يؤديها في العين. وهكذا فإن المنظومة الكلية المخصصة لتكوين عدسة العين كانت موجودة أصلًا في السلف المشترك للفقاريات ولنفاخات البحر، قبل أن يشق كلٌّ منهما طريقه. وقد حدثت عملية تحويل تنظيمية صغيرة في الفقاريات نقلت هذا البروتين من المخ إلى العين. ويُفترَض أنه حدثت عمليات غزو مشابهة أدت إلى عمليات «تجنيد» متكررة لبلورينات أخرى من أماكن أخرى

بالجسم، بعضها في السلف المشترك للفقاريات، بينما وُجِدَ البعض الآخر في وقت أحدث في مجموعات حيوانية معينة. وليس معروفًا السبب في عدم حدوث عملية التحويل البسيطة لاستخدام مصدر البلورين لدى حيوان نفاخة البحر؛ ربما لأن حصوله على صخرة يلتصق بها أمر سهل نسبيًّا حتى بدون عدسة للعين، فهو لا يحتاجها. وحتى في هذه الحالة فإنه يُعَدُّ حالة فريدة؛ فمعظم الفقاريات حدثت فيها هذه العملية — إذ حدثت إحدى عشرة مرة على الأقل — ومن ثم لا تُوجَد خطوات شديدة الصعوبة في تسلسل تكوين العين.

وإذا تركنا هذا الخضم المتوافق من البروتينات والبلورات والمعادن التي تُشكِّل تركيبة عدسة العين لدى أنواع متشعبة من الحيوانات، فسنجد أن بروتينات شبكية العين تختلف اختلافًا كبيرًا. من هذه البروتينات نوع محدد يبرز في تميزه؛ إذ تُعتَبَر جزيئاته مسئولة عن الإحساس بالضوء، وهي مادة صبغية تُسمَّى «الرودوبسين». وعلينا العودة بالذاكرة إلى نوع جمبري الفوهات، الذي يُسمَّى علميًّا «ريميكاريس إكسوكيولاتا»، بما لديه من شبكيتين مكشوفتين سطحيتين. فبالرغم من التميُّز الواضح لعالم الفوهات في أعماق المحيط، وبالرغم من غرابة الشبكيتين المكشوفتين على ظهر هذا النوع من الجمبري، وبالرغم من قدرة هذا الجمبري العجيبة على إدراك البصيص الخافت من الضوء، بينما لا يستطيع البشر ذلك، وبالرغم من تعيُّشه على بكتيريا الكبريت، وأن دمه أزرق، وليس لديه عمود فقاري، ومع أن آخر تشارك له مع البشر في سلف مشترك هو منذ حوالي ٦٠٠ مليون سنة مضت، أي قبل ما يُسمَّى الانفجار الكمبري بكثير … بالرغم من كل ذلك، فإن هذا النوع من الجمبري يستخدم نفس البروتين الذي نستخدمه نحن البشر في الإبصار. فهل هذه الرابطة العميقة عَبْر الزمان والمكان لا تزيد عن كونها مجرد مصادفة عجيبة، أم أنَّ الأمر أكثر أهمية من هذا؟

صحيح أن بروتين الإبصار الموجود في الجمبري وذلك الذي في البشر ليسا متماثلين تمامًا، ولكنهما متشابهان لدرجة كبيرة جدًّا، لدرجة أنك إذا وقفت في ساحة القضاء محاولًا إقناع القاضي بأن وجود الرودوبسين لديك ليس انتحالًا مكشوفًا لما سبق؛ فالأرجح ألا تكسب القضية، بل ربما تحوَّلت إلى مادة للضحك والسخرية، فالرودوبسين لا يقتصر وجوده على جمبري الفوهات والبشر، ولكنه واسع الانتشار في جميع أنحاء المملكة الحيوانية. على سبيل المثال نحن لا نعرف سوى القليل عن آليات العمل الداخلية للعين

في ثلاثيات الفصوص، تلك الآليات التي لم يتم حفظها مع عدساتها العينية البلورية، ولكننا نعرف ما يكفي عن أقربائها بحيث نقول بشيء من الجزم إن أعينها احتوت على الرودوبسين. وجميع الحيوانات، عدا استثناءات قليلة، تعتمد على نفس البروتين تمامًا. وإن محاولتك إقناع القاضي بأن الرودوبسين الذي لديك ليس منتحلًا يشبه محاولتك الادعاء أن جهاز تليفزيونك مختلف أساسًا عما لدى الآخرين من أجهزة التليفزيون لمجرد أنه أكبر حجمًا أو لأن شاشته مسطحة.

هذا التشابه الواضح يمكن أن يأتي من طرق عدة؛ فقد يعني أن الجميع ورثوا نفس البروتين من سلف مشترك. لقد حدث الكثير من التغيرات الصغيرة خلال الـ ٦٠٠ مليون سنة الأخيرة بطبيعة الحال، ولكنه لا يزال نفس البروتين كما هو واضح. أو قد يعني أنه تُوجَد ضغوط تصميمية شديدة على الجزيئات القادرة على إدراك الضوء جعلت جميع الأنواع مدفوعة إلى تطوير البروتين عينه. وهذا يشبه مشاهدة برامج التليفزيون على شاشة الكمبيوتر؛ فهذه حالة من التقنيات المختلفة التي تتلاقى عند حل متماثل. أو قد تعني، في نهاية المطاف، أن الجزيئات قد تم نقلها من نوع إلى آخر، في حالة من السطو العدواني لا الوراثة.

لكن يمكننا بسهولة حذف ذلك الاحتمال الثالث والأخير. فصحيح أن هناك ما تُسمَّى سرقة الجينات بين أنواع الكائنات (إذ تنتقل الجينات عن طريق حالات العدوى الفيروسية على سبيل المثال)، ولكنه ليس أمرًا شائعًا خارج نطاق البكتيريا، وحينما يحدث فإنه يكون بارزًا بوضوح مثل إصبع داحس. إن قائمة الفروق الطفيفة بين البروتينات عَبْر أنواع الكائنات يمكن مطابقتها بالعلاقات المعروفة بين الأنواع. وإذا كان قد حدث سطو على البروتين البشري وتم إدخاله في جمبري الفوهات، فسيكون واضحًا للغاية أمام أنظارنا؛ إذ سيبدو واضحًا أنه ينتمي إلى البشر وليس إلى الجمبري. من ناحية أخرى، إذا كانت الفروق قد تراكمت تدريجيًّا بمرور الزمن في أسلاف الجمبري فسيكون بروتين الجمبري أشد شبهًا بأقرب أقربائه وهما القريدس وجراد البحر، وسيكون أشد اختلافًا عن أبعد أقربائه، مثل البشر، وهذا هو الحال حقًّا.

فإذا لم يكن الرودوبسين قد سُرِق، فهل أُعِيدَ تخليقه لضرورات الهندسة الوراثية؟ يصعب قبول هذا الرأي؛ لأنه يستلزم حدوث عملية إعادة اختراع، ولو لمرة واحدة. فبالنسبة لجزيئين متشابهين، يُعَدُّ رودوبسين جمبري الفوهات بعيدًا عن الرودوبسين البشري لأقصى درجة ممكنة. وفيما بين الاثنين يُوجَد طَيْفٌ من الأشكال الوسيطة،

ولكن هذا الطيف ليس مستمرًّا تمامًا؛ بل إنه يتركز في مجموعتين تنتميان بالتقريب إلى الفقاريات من ناحية، وإلى اللافقاريات من الناحية الأخرى (بما فيها الجمبري). وهذا الفرق يتضخم بفعل نطاق كامل من المتضادات. ففي كلتا الحالتين تُعتبَر الخلايا الحساسة للضوء خلايا عصبية معدلة، ولكن التماثل ينتهي عند هذا الحد. ففي الجمبري واللافقاريات الأخرى يحدث توصيل للرودوبسين بالأغشية التي تبرز من قمة الخلية مثل الشعر الشائك (وتُسمَّى الزغيبات)، وفي الفقاريات يبرز نتوء واحد (يُسمَّى الهدب) من قمة الخلية مثل برج الاتصالات. ويلتفُّ هذا البرج في شكل ثنيات أفقية عميقة؛ مما يجعله يبدو مثل كومة من الأقراص تستقر فوق قمة الخلية.

وفي داخل الخلايا المستقبلة للضوء يكون لهذه الاختلافات نظائرها في علم الكيمياء الحيوية. ففي الفقاريات، حينما يحدث امتصاص للضوء تنطلق سلسلة من الإشارات لتقوِّي الشحنة الكهربية عَبْر غشاء الخلية. ويحدث العكس تمامًا لدى اللافقاريات؛ فحينما يُمتَص الضوء، تنطلق سلسلة مختلفة تمامًا من الإشارات التي تجعل الغشاء يفقد شحنته الكهربية بالكامل؛ وهذا بالذات هو ما يحفز العصب لكي يطلق رسالة إلى المخ تقول: هناك ضوء! وبصفة إجمالية يُوجَد نوعان متماثلان تقريبًا من الرودوبسين في نمطين خلويين متناقضين بمعنى الكلمة. ألا يعني كل هذا أن الخلايا المستقبلة للضوء قد نشأت مرتين: مرة في اللافقاريات ثم مرة أخرى في الفقاريات؟

هذا يبدو بالتأكيد إجابةً مقبولةً، وهو ما كان يعتقده أغلب المنتمين إلى هذا الحقل العلمي حتى منتصف عقد تسعينيات القرن العشرين حينما تغيَّرَ كلُّ شيء فجأةً. لا خطأ في أيٍّ من هذه الحقائق، ولكن تبيَّنَ فقط أنها تُمثِّل نصف القصة فحسب. ويبدو الآن كما لو أن كل إنسان يستخدم الرودوبسين لأنه ورثه عن سلف مشترك. ويبدو كما لو أن الأصل الأول للعين قد نشأ مرة واحدة فقط.

انبرى فالتر جيرنج، وهو عالم أحياء سويسري محطم للمعتقدات البالية من جامعة بازل، معلقًا على هذا التنقيح بأقوى صورة. إن جيرنج الذي كان أحد مكتشفي جينات هوكس (المسئولة عن وضع مخطط الجسم) توصَّلَ أيضًا إلى اكتشاف بارز ثانٍ في عام ١٩٩٥، وذلك في واحدة من أكثر تجاربه إثارةً للدهشة في علم الأحياء. فقد أخذ فريق جيرنج جينًا من أحد الفئران وأدخلوه في ذبابة الفاكهة. لم يكن ذلك جينًا عاديًّا له دور تركيبي هيِّن وإنما كان خطير التأثير؛ فعند إدخاله بدأت ذبابة الفاكهة فجأة في إنبات أعين كاملة على أرجلها وأجنحتها وحتى قرون استشعارها (انظر الشكل ٧-٦).

وهذه العيون الصغيرة الغريبة التي تنبثق من أماكن مميزة لم تكن تلك الأعين المألوفة التي تشبه الكاميرا والموجودة لدى الفئران والبشر، ولكنها أعين مركبة، تتصف بكل أنواع الصفات المميزة للحشرات والقشريات. والذي أثبتته هذه التجربة القاسية هو أن الجينات المطلوبة لتكوين العين لدى الفأر ولدى الذبابة متماثلة. فقد تَمَّ حفظ تلك الجينات بأمانة مذهلة على مدى ٦٠٠ مليون سنة من التطوُّر منذ آخر سلف مشترك للفقاريات واللافقاريات، إلى درجة أنها ما زالت قابلة للعمل على نحوٍ تبادلي. فإذا وضعت جين الفأر في ذبابة فسيتولَّى أمر أجهزة الذبابة، أينما تمَّ وضعه، موجهًا مجموعة الجينات الفرعية الخاضعة له بالذبابة بصنع عين في نفس المكان على الفور.

درَّس الفيلسوف الألماني نيتشه لبعض الوقت في جامعة بازل. وربما لتكريمه، أطلق جيرنج على جين الفأر اسم «الجين المسيطر»، قياسًا على فكرة «الجنس المسيطر» الخاصة بنيتشه. وأتساءل إن كان من الأنسب أن نطلق عليه اسم «الجين المايسترو»، فبالتأكيد تلك التسمية أقل تفخيمًا وأقرب إلى روح الجماعة المترابطة؛ إذ يعمل الجين مثل قائد الأوركسترا الذي يستحضر أجمل الصيغ الموسيقية دون أن يصدر أي نغمات موسيقية من جهته. فيعمل الجين على تجميع تراكيب العين عن طريق حثِّ «العازفين»، كلٌّ على حدة وكلٌّ مؤدٍّ دوره المنوط به. ثمة صور مختلفة معروفة لنفس الجين بالفعل من خلال ما حدث له من طفرات في الذباب والفئران والبشر. ففي الفئران والذباب أُطْلِق على الجين اسم «العين الصغيرة» و«اللاعيني» على الترتيب، مُعَبِّرًا بألفاظ معكوسة — وهو ما دأب علماء الوراثة على القيام به — عن مقدار النقص الذي يتسبَّب به غيابه. أما في حالة البشر، فإن الطفرات في نفس الجين تُسبِّب مرض اختفاء قزحية العين؛ إذ لا تتكوَّن قزحية العين، وهي حالة مزعجة وكثيرًا ما تُسبِّب العمى، إلا أن هذه تُعَدُّ نتيجةً محدودةَ الأثر بالنسبة لجين مسيطر يُفترَض أنه يُشرف على عملية تكوين العين ككلٍّ. ولكن هذه الحالة المرضية تَحْدُث فقط إذا كان ثمة تلف في نسخة واحدة فقط من هذا الجين، ولكن إذا كانت كلتا النسختين تالفتين أو مفقودتين فلا يتكوَّن الرأس بكامله.

ولقد زادت الصورة تعقيدًا منذ تجربة جيرنج الرائدة. يُعرَف «الجين المسيطر» الذي اكتشفه جيرنج اليوم باسم باكس٦. وقد اتضح أنه أكثر قوة وأكثر تفاعلًا مع جينات أخرى مما كان يُظَن سابقًا؛ فقد اتضح أن باكس٦ يعمل في جميع الفقاريات واللافقاريات، بما فيها الجمبري، بل اكتُشِف جينٌ آخرُ وثيق الصلة به في قنديل البحر. كما اتضح أن باكس٦ ليس مسئولًا عن عملية تكوين العينين فحسب، بل عن تكوين



شكل ٧-٦: صورة مسحية بالمجهر الإلكتروني لرأس ذبابة الفاكهة تظهر عينًا زائدة شديدة الصغر على قرن الاستشعار، تكوَّنَتْ بتأثير الهندسة الوراثية؛ باستخدام الجين باكس٦ من فأر. إن الجين نفسه يتحكَّم في نشوء العين في كلٍّ من الفقاريات واللافقاريات، ويُرجَّح أنه قام بهذا الدور في سلفهما المشترك، ربما منذ ٦٠٠ مليون عام.

أجزاء كبيرة من المخ؛ ومن ثم يَحْدُث قصور في تكوين الرأس في حالة غياب كلتا نسختَيْ هذا الجين المهم. وفي نفس الوقت، فإن جين باكس٦ لا يُوجَد وحيدًا، بل تُوجَد جينات أخرى يمكنها أيضًا أن تشرف على تكوين العيون الكاملة في ذبابة الفاكهة. وفي الواقع يبدو الأمر سهل الحدوث. هذه الجينات ترتبط فيما بينها جميعًا، كما أنها موغلة في القِدَم، وأغلبها يُوجَد في كلٍّ من اللافقاريات والفقاريات، ولكن مع أدائها أدوارًا مختلفة وفي سياقات مختلفة لدرجة طفيفة. ومما يثير الحزن أن موسيقى الحياة الجميلة لا يتم استدعاؤها على يد مايسترو، ولكن على يد «لجنة» صغيرة.

الخلاصة أن نفس «اللجنة» من الجينات تتحكَّم في عملية تكوُّن العين في كلٍّ من الفقاريات واللافقاريات. وخلافًا لما يحدث بالنسبة للرودوبسين فلا يُوجَد سببٌ «هندسيٌّ» عمليٌّ يجعل تلك العملية خاضعة لتحكم نفس الجينات؛ فجميعها تعمل كموظفين بيروقراطيين عديمي المشاعر، وكان من الممكن أن تُؤدَّى المهام التي يؤدونها على يد مجموعة أخرى من الموظفين البيروقراطيين عديمي المشاعر. لكن حقيقة أن هذا العمل تقوم به المجموعة نفسها دومًا (بعكس ما يحدث بالنسبة لبروتينات عدسة العين مثلًا)، تكشف عن اليد الخفية للتاريخ، عن غرابة المصادفة لا قوة الحتمية. وهذا التاريخ يُوحِي بأن الخلية المستقبلة للضوء قد نشأت دفعة واحدة لدى سلف مشترك للفقاريات واللافقاريات، تحت تحكُّم لجنة صغيرة من الجينات.

ثمة سبب آخر للاعتقاد بأن الخلية المستقبلة للضوء نشأت دفعة واحدة؛ وهو دليل مباشر مأخوذ من حفرية حية. هذا الكائن هو دودة بحرية صغيرة؛ تُسمَّى «بلاتينيريس»، طولها مليمترات قليلًا ومغطاة بشعيرات صلبة. وهي تعيش في مصابِّ الأنهار الموحلة وتُعَدُّ طعمًا مفضلًا لصيَّادِي الأسماك بالشص. وقد يتساءل المرء كم شخصًا يعرف أن هذا الحيوان لم يتغيَّر شكله العام وتركيبه ككلٍّ إلا بالكاد منذ العصر الكمبري. العجيب أن دودة كهذه كانت السلف المشترك لكلٍّ من الفقاريات واللافقاريات. وهي مثل جميع الفقاريات، وكثير من اللافقاريات جسمها متماثل جانبيًّا، أي إن جانبيها متطابقان، بخلاف حيوان كنجم البحر. وهذا التماثُل الجانبي هو من الصفات المميزة للبشر ولحيوانات كثيرة أخرى كالحشرات. ومن المهم أن نعرف أن تلك الدودة البسيطة نشأت وفيها مسبقًا هذا التصميم التكويني القوي، قبل أن يحدث الانفجار الحيوي الذي تمخَّضَتْ عنه جميع الحيوانات الرائعة التي نراها حولنا اليوم. إنها بمنزلة حفرية حية لكائن متماثل جانبيًّا، أولى الحيوانات المتماثلة جانبيًّا. ولهذا اهتم العالم دتليف أرينت وزملاؤه بالمعمل الأوروبي للبيولوجيا الجزيئية في هايدلبرج بألمانيا بخلاياها المستقبلة للضوء.

عرف أولئك العلماء أن عيون تلك الدودة مشابهة في تصميمها لعيون اللافقاريات، وليس لعيون الفقاريات، حتى في نوع الرودوبسين الذي تستعمله. ولكن في عام ٢٠٠٤ اكتشف فريق هايدلبرج مجموعة أخرى من الخلايا المستقبلة للضوء مدفونة في مخ الدودة. لم تكن تلك تُستخدَم في الإبصار مطلقًا ولكنها تُستخدَم كساعة توقيتية بيولوجية، تتعلق بتلك الإيقاعات الحيوية الداخلية التي تتحكَّم في النوم واليقظة وتُميِّز

الليل عن النهار، حتى في البكتيريا. ولم يقتصر الأمر بالنسبة لتلك الخلايا المستقبلة للضوء التي تعمل كساعة بيولوجية على استخدامها للرودوبسين، بل كان جليًّا أيضًا (لخبراء مثل أرينت على الأقل) أنها مثل الخلايا الضوئية للفقاريات، وهو اكتشاف تمَّ إثباته فيما بعد باختبارات مفصَّلة كيميائية حيوية وجينية. واستنتج أرينت أن ذلك الحيوان لديه كلا النوعين من الخلايا الضوئية. وهذا يعني أنَّ نوعَي الخلايا هذين لم ينشآ مستقلَّين في خطَّيْن مختلفين بالكامل، ولكنهما يُعتبَران خلايا «شقيقة» نشأت معًا في نفس هذا الكائن، الذي هو سلف الحيوانات المتماثلة جانبيًّا.

بطبيعة الحال، إذا كان هذا السلف المشترك للفقاريات واللافقاريات امتلك كلا النوعين من الخلايا الضوئية، فلربما ورثنا نحن كلا النوعين هذين، وما علينا إلا أن ننظر في الاتجاه الصحيح كي نجدها. ويبدو أننا فعلنا ذلك بالفعل. ففي العام التالي للعام الذي باحت فيه تلك الحفرية الحية بأسرارها، قام العالم ساتشين باندا وزملاؤه بمعهد سولك في سان دييجو بولاية كاليفورنيا الأمريكية بمتابعة إحساسٍ راوَدَهم بشأن بعض الخلايا في عين الإنسان — وهي الخلايا العقدية الشبكية — التي تؤثِّر في إيقاعات الساعة البيولوجية لدى البشر. ومع أن تلك الخلايا ليست متخصصة في الإحساس بالضوء، فإنها أيضًا تحتوي على الرودوبسين، ولكنه شكل فريد منه يُعرَف بالميلانوبسين، وقد عُرِف أنه مميز للخلايا الضوئية في اللافقاريات. المثير للاهتمام أن هذا الرودوبسين الموجود في الأعين البشرية أقرب في تركيبه إلى الرودوبسين الذي في الشبكيات المكشوفة لدى جمبري الفوهات أكثر مما هو للنوع الآخر من الرودوبسين الموجود معه في الشبكية البشرية.

كل هذا يوحي بأن الخلايا الضوئية لدى الفقاريات واللافقاريات نبعت من معين واحد. ويقول العلماء إنها ليست إبداعات منفصلة، ولكنها خلايا شقيقةٌ، لها أمٌّ مشتركة. وتلك الأم المشتركة — الخلية الضوئية البدائية التي هي سلف جميع عيون الحيوانات — نشأَتْ دفعة واحدة.

ومن هنا تبرز صورة أكبر، وهي وجود نمط واحد من الخلية الحساسة للضوء، يحتوي على الصبغ البصري الرودوبسين ونشأ في سلف مشترك للفقاريات واللافقاريات، تحت سيطرة لجنة صغيرة من الجينات. وفيما بَعْدُ حدَثَ تضاعفٌ للخلية الحسَّاسة للضوء، وصارت الخليتان الوليدتان متخصصتين في أداء وظائفهما إما في عيون وإما في ساعة بيولوجية. ولأسباب ما، قد تكون من قبيل مصادفة، تمَّ انتقاء أنماط مختلفة من الخلايا لكلٍّ من الفقاريات واللافقاريات لأداء هذه المهام، بحيث تكوَّنَتِ العيون من

أنسجة مختلفة في هذين الخطين؛ مما أدَّى إلى حدوث اختلافات جنينية رئيسية بين عيون متشابهة في كائنات كالأخطبوط والإنسان، على سبيل المثال. كانت المحطة الأولى على طريق تكوُّن العين الكاملة هي الشبكية المكشوفة؛ وهي رقعة من الخلايا الحساسة للضوء، تتكوَّن من نمط أو آخر من الخلايا الحساسة للضوء؛ تبعًا لتوارث الصفات. وتبقى لدى بعض الكائنات الشبكيات المكشوفة المسطحة البسيطة بينما حَدَثَ لدى البعض الآخر تجوُّف للرقع الحساسة للضوء فتحوَّلَتْ إلى حفر يمكنها أن تعطي صورة باهتة وإحساسًا بالمصدر الذي يأتي منه الضوء. ومع ازدياد تعمُّق هذه الحفر حدثَتْ علاقة تبادلية بين الحساسية للضوء وتوضيح الصورة؛ مفادها أن أي شكل من أشكال العدسات العينية كان أفضل من لا شيء مطلقًا، وأن جميع أنواع المواد غير المتوقعة، من المعادن إلى الإنزيمات، كانت مجنَّدة لهذه المهمة. وقد حدثت عملية متشابهة في خطوط مختلفة، أدَّتْ إلى تشكيلة متنوِّعة من أنماط العدسات، إلا أن القيود البصرية حيال تكوين عين عاملة قيَّدَتْ هذا التنوع عند المستوى الجزيئي إلى مدى محدود من التراكيب الرئيسية؛ التي تتراوح من العيون الشبيهة بالكاميرا (مثل عيون البشر) إلى العيون المركبة (عند الحشرات).

هناك بالطبع تفاصيل لا حصر لها، ولكننا هنا نُقدِّم نبذة مختصرة عن كيفية نشوء العين. ولا غرو أننا نتشارك في نفس الرودوبسين مع جمبري الفوهات؛ فلقد ورثناها كلنا عن نفس السلف القديم. ولكن هذا الأمر يتركنا أمام تساؤل كبير نختتم به هذا الفصل: من كان ذلك السلف؟ والإجابة مرة أخرى تكمن في الجينات الوراثية.

كانت سيندي فان دوفر وهي تغوص في أعماق البحر تجاه الفوهات مهمومة بشأن الضوء في تلك البقاع. فمن الظاهر أن الجمبري الذي يسكن هناك يمكنه إدراك الضوء الأخضر بحساسية غير عادية مستخدمًا نوعًا من الرودوبسين مشابهًا لما يُوجَد في عيون البشر، إلا أن الفحوص المبكرة أظهرت أن تلك الفوهات لا يُوجَد فيها ضوء أخضر. فما الذي يحدث إذن؟

قدَّم أحد الباحثين البارزين نصيحة تشوبها المرارة إلى عدد من العلماء الشبان أثناء خطبة له بمناسبة تقاعده، مؤكدًا فيها على أنه لا يجوز تحت أي ظرف من الظروف أن يكرر المرء تجربة ناجحة؛ حتى لا تفضي إلى نتيجة مريرة ومخيبة للآمال.[٨] أما النصيحة المناقضة — وهي ألا يتردَّد المرء في أن يكرِّر تجربة فاشلة — فهي أقل واقعية، إلا أن

فان دوفر كان لديها سبب قوي للتجربة. الرودوبسين مادة جامدة، وهي كالرجل الميت لا تكذب، وإذا كانت هذه المادة تمتص ضوءًا أخضر فلا بد أنه كان ثمة ضوء أخضر لكي تمتصه. ويبدو أن الأجهزة العتيقة التي كانت تُستخدَم في الدراسات المبكرة لم تكن في درجة حساسية شبكية الجمبري المكشوفة.

وقد أعدَّ علماء الفضاء بوكالة ناسا مقياسًا للضوء جديدًا وأكثر دقة وتعقيدًا، وهم يعرفون كل المعلومات اللازمة للكشف عن الإشعاع في الظلمة الحالكة التي تَسُود الفضاء الخارجي. وهذا الجهاز الذي أُطلِق عليه اسم «نظام التصوير الضوئي المحيطي والطيفي» بإمكانه الكشف عن الضوء بفاعلية ولكن بأطوال موجية أخرى. وعند إنزال الجهاز إلى عالم الفوهات العجيب سجل قمة صغيرة في الجزء الأخضر من الطيف الضوئي بدرجات قوية من الشدة أعلى مما كان متوقعًا على أساس نظري. وسرعان ما تأكدت القياسات الجديدة في فوهات أخرى. ومع أن مصدر هذا الوهج الأخضر الغريب لا يزال غامضًا، فما أكثر ما أُطلِق من نظريات غريبة لتفسيره! فعلى سبيل المثال يمكن أن يتسبَّب انبثاق فقاقيع صغيرة من الغاز من الفوهات وانسحاقها بفعل الضغط المرتفع بالمحيط في نشوء ضوء مرئي، كما يمكن أن ينتج الضوء أيضًا عن تكوُّن البلورات وتهشُّمها بفعل الحرارة والضغط.

وإذا كان اعتقاد فان دوفر المتعلِّق بالرودوبسين صحيحًا؛ فهذا لأنه الأكثر ترجيحًا. فللرودوبسين قدرة كبيرة على التأقلم حسب الظروف السائدة. ولقد سُمِّي المحيط الأزرق العميق بهذا الاسم لأن الضوء الأزرق يتغلغل أكثر خلال الماء من سائر الأطوال الموجية الأخرى. فالضوء الأحمر سرعان ما يمتصه الماء، ولا يمكنه التوغل كثيرًا، والضوء الأصفر يمكنه التوغل أكثر قليلًا فقط، والبرتقالي أكثر من الأصفر قليلًا أيضًا. ولكن بدءًا من عمق عشرين مترًا في الماء يكون معظم الضوء أخضر وأزرق، ثم يزداد الماء زرقة بازدياد العمق. ويتشتَّت الضوء الأزرق فيما حوله؛ مما يجعل كل الأشياء في عمق المحيط تكتسب مسحة من اللون الأزرق. وتتبع أصباغ الرودوبسين لدى الأسماك هذا التحوُّل إلى اللون الأزرق ببراعة؛ وهي حيلة تُعرَف بالتناغم الطيفي. ومن ثم فعلى عمق ٨٠ مترًا في الماء نَجِدُ سمكًا فيه أنواع من الرودوبسين تمتص الضوء الأخضر لأعلى درجة (عند طول موجي حوالي ٥٢٠ نانومترًا)، ولكن على عمق ٢٠٠ متر، عندما يكون الضوء في أَخْفَتِ درجاته، يكون لدى السمك أنواع من الرودوبسين تمتص الضوء الأزرق (عند حوالي ٤٥٠ نانومترًا). ومما يثير الاهتمام أن سرطان الفوهات من نوع بيثوجرايا ثرميدرون،

الذي ذكرناه من قبل، يقوم بعكس هذا التحول أثناء تحرُّكه إلى الفوهات. فيرقات هذا السرطان تعيش في المياه الزرقاء العميقة، ولديها نوع من الرودوبسين يمتص الضوء الأزرق لأعلى درجة عند طول موجي مقداره ٤٥٠ نانومترًا. وعلى النقيض من هذا يُوجَد في الشبكية المكشوفة في السرطان البالغ نوع من الرودوبسين يمتص الضوء عند طول موجي ٤٩٠ نانومترًا، وهو أقرب إلى اللون الأخضر. إنها طفرة صغيرة لكنها مقصودة. وحينما عرفت فان دوفر أن رودوبسين جمبري الفوهات أيضًا يمتص الضوء الأخضر عند ٥٠٠ نانومتر تأكدت شكوكها بدرجة كبيرة.

يعتمد الإبصار اللوني لدى البشر على قدرة الرودوبسين على تحويل الأطوال الموجية. لدينا نمطان من مستقبلات الضوء في شبكية العين: الخلايا العصوية، والخلايا المخروطية (أو ما تُسمَّى بالعصي والمخاريط). وتحديدًا نقول إن العصي فقط هي التي تحتوي على الرودوبسين، بينما تحتوي المخاريط على واحدة من ثلاثة أنواع من «الأوبسينات المخروطية». ولكن في حقيقة الأمر إن هذا التمييز غير مفيد؛ إذ إن جميع هذه الأصباغ البصرية متماثلة أساسًا في تركيبتها. فكلها تتكوَّن من نمط محدد من البروتين — يُسمَّى «الأوبسين»، يسد غشاء الشبكية في خط متعرج سباعي — ويرتبط بمادة مشتقة من فيتامين أ تُسمَّى «رتينال». والرتينال مادة صبغية، وتُعتبَر في حد ذاتها الوحيدة المسئولة عن امتصاص الضوء. وحينما تمتص فوتونًا من الضوء يتغيَّر شكلها من الملتوي إلى المستقيم، وهذا يكفي لجعله في حالة حركة على مدار العملية الكيميائية الحيوية التي تنتهي بإعطاء إشارة إلى المخ بأن هناك ضوءًا.

ومع أن الرتينال هو الذي يمتص الضوء، فإن أهم عامل لإحداث التناغم الطيفي — إلى حد بعيد — هو تركيبة بروتين الأوبسين؛ إذ يمكن أن تؤدِّي التغيرات الصغيرة في تلك التركيبة إلى تحويل امتصاصية هذا البروتين من الأشعة فوق البنفسجية (حوالي ٣٥٠ نانومترًا) في الحشرات والطيور إلى اللون الأحمر (حوالي ٦٢٥ نانومترًا) في الحرباء. ومن ثم، عن طريق الجمع بين أنواع عدة من الأوبسينات المتباينة قليلًا — وكلٌّ منها له معدل امتصاص مختلف — يمكن أن يتحقَّق الإبصار اللوني. وتستطيع أوبسينات المخاريط في الإنسان أن تمتص الضوء في أعلى الدرجات عند الأجزاء الزرقاء (٤٣٣ نانومترًا) والخضراء (٥٣٥ نانومترًا) والحمراء (٥٦٤ نانومترًا) من الطيف، وبتجميعها معًا تعطي المدى البصري المألوف لدى البشر.[٩]

ومع أن الأوبسينات بصفة عامة تتشابه في تركيبتها الإجمالية، فإن الفروق بينها تكشف عن تاريخ حياة مثير. فجميعها تكوَّنَتْ بالتضاعف متبوعًا بالتباعد، ومن ثم

يمكن اقتفاء أصولها حتى نصل إلى جين أوبسيني سلفي. وتبسيطًا نقول إن بعض عمليات التضاعف هذه حدثت في وقت أكثر حداثة من البعض الآخر. وتُعتبَر الأوبسينات الخاصة باللونين الأحمر والأخضر وثيقة الصلة فيما بينها، على سبيل المثال: لقد حدث تضاعف للجين لدى سلف مشترك للرئيسيات (التي تشمل الإنسان والقردة العليا). وأعطى هذا التضاعف الرئيسيات ثلاثة أنماط من أوبسين المخاريط (أو ربما حدَثَ هذا بعد أن تباعدت قليلًا) وليس اثنين فقط؛ مما أكسب معظمنا نحن البشر إبصارًا ثلاثي الألوان. ولكن هناك قلة سيئة الحظ ممن يعانون العمى اللوني فيما يتعلَّق باللونين الأحمر والأخضر؛ لأنهم يفتقدون واحدًا من هذه الجينات؛ مما جعل إبصارهم ثنائي الألوان مثل جميع الثدييات الأخرى تقريبًا، ولعل ضعف إبصارهم انعكاسٌ لماضٍ حديث نسبيًّا كان فيه الحيوان يقضي لياليه مختبئًا من الديناصورات! ثمة عدم اتفاق بشأن السبب في أن الرئيسيات استردَّتِ الإبصار ثلاثي الألوان. وتفترض النظرية الأكثر انتشارًا أن هذا الإبصار ساعَدَها على تمييز الثمار الحمراء من بين الأوراق الخضراء. وثمة فكرة ذات وجهة اجتماعية أكثر تقول إنه ساعدها على تمييز المشاعر والتهديدات والإشارات الجنسية، التي تتراوح من احمرار الوجه (خجلًا أو ارتباكًا) إلى ظهور الكذب على الوجوه المكشوفة (ومما يثير الاهتمام أن جميع الرئيسيات ثلاثية الإبصار اللوني وجوهها مكشوفة؛ أي غير مغطاة بالشعر).

قلتُ توًّا إن الرئيسيات «استردَّت» الإبصار ثلاثي الألوان، ولكننا في الواقع ما زلنا أكثر فقرًا، من ناحية الإبصار اللوني، من فقاريات أخرى كثيرة. فجميع الزواحف والطيور والبرمائيات وأسماك القرش لديها إبصار رباعي الألوان، ويبدو من المرجح أن السلف المشترك للفقاريات كان رباعي الإبصار اللوني متمتعًا بقدرة على رؤية حتى المنطقة فوق البنفسجية من الطيف.[١٠] وقد أكدَّتْ تجربة رائعة هذا الاحتمال، وذلك عن طريق مقارنة التسلسلات الجينية لدى فقاريات حية. وقد تنبأ عالمان هما يونجشنج شي وشوزو يوكوياما من جامعة سيراكيوز في نيويورك بتسلسل الجين لدى سلف الفقاريات ولكن حتى الآن ليست لدينا وسيلة للتخمين — من خلال المبادئ الأولية وحدها — بما يمكن أن يكون الطول الموجي بالضبط لما امتصَّه هذا الرودوبسين السلفي من ألوان. ولقد استخدم شي ويوكوياما تقنيات الهندسة الوراثية لبناء المادة البروتينية، ثم قاسَا امتصاصيتها للضوء مباشرةً. وقد تبيَّن لهما حينئذٍ أنها تقع في المنطقة فوق البنفسجية (٣٦٠ نانومترًا).

ويقع أعمق فرع في شجرة الأوبسينات فيما بين الفقاريات واللافقاريات كما رأينا. ولكن حتى تلك الحفرية الحية، التي هي أول الحيوانات المتماثلة جانبيًّا، وهي تلك الدودة المَهينة المسماة بلاتينيريس، لديها مع ذلك نمطان من الأوبسينات الحيوانية، يقابلان ما بالفقاريات واللافقاريات. ومن ثم يكون السؤال: ما طبيعة ذلك السلف الأصلي لجميع الأوبسينات الحيوانية، ومن أين جاء؟ الإجابة غير معروفة بشكل مؤكَّد، وهناك نظريات عدَّة تحاول الإجابة عن هذا السؤال. إلا أن مرشدنا لهذا هو الجين نفسه، ولقد تتبَّعنا أثره إلى ماضي الزمان عَبْر ٦٠٠ مليون عام مضت. فإلى أي مدى يمكننا الرجوع إلى الوراء أكثر من هذا؟ يُصرِّح بيتر هيجمان وزملاؤه بجامعة ريجنزبورج في ألمانيا بأن الجين يعطينا إجابة بالفعل، وهي إجابة غير متوقَّعة بمعنى الكلمة؛ إذ يقولون إن أقدم سلف للعين نشأ في الطحالب.

الطحالب — مثلها في ذلك مثل النباتات — تستخدم عملية البناء الضوئي بكفاءة، ويمكن أن تتكوَّن فيها جميع أنواع الأصباغ الدقيقة الحساسة للضوء. ويستخدم كثيرٌ من الطحالب هذه الأصباغ التي تُوجَد في بقع عينية بسيطة، وظيفتها الإحساس بشدة الضوء، وفعل شيء حياله، إذا لزم الأمر. وعلى هذا الأساس، نجد على سبيل المثال الطحلب الرائع الجميل المسمى «فولفوكس» يتركب من كرات مجوفة تتكون من مئات الخلايا، وقد يصل قطر كل كرة طحلبية منها إلى مليمتر واحد. ويخرج من كل خلية سوطان تضرب بهما الخلية كالمجاديف في الماء، وأسواط الفولفوكس تتوقَّف حينما يكون الضوء مبهرًا، وتضرب حينما يسود الظلام، أو يكون الضوء خافتًا؛ لتوجه الكرة الطحلبية بكاملها تجاه الشمس؛ متوخِّيةً أفضل ظروف لأداء عملية البناء الضوئي. وتتحكم البقع العينية في عملية إصدار الأمر للطحلب بالتوقف. والمفاجأة هي أن الصبغ الحساس للضوء في البقع العينية للفولفوكس هو الرودوبسين.

ولعلَّ الأعجب من هذا أن رودوبسين طحلب الفولفوكس يبدو كأنه سلف لجميع الأوبسينات الحيوانية. ويحتوي موقع ارتباط الرتينال بالبروتين في الشبكية على أقسام تكون مماثلة تمامًا لأوبسينات كلٍّ من الفقاريات واللافقاريات، وهي في الواقع خليط من كلٍّ منهما من الناحية العملية، كما أن التركيب العام للجين بما فيه من خلط انتقائي من تسلسلات مشفِّرة وغير مشفِّرة (تُعرَف تقنيًّا بالأنترونات والإكسونات) ينمُّ عن وجود ارتباط قديم بأوبسينات كلٍّ من الفقاريات واللافقاريات. لا يُعَدُّ هذا برهانًا، ولكنه بالضبط ما قد يتوقَّعه المرء لسلف كلتا العائلتين. وهذا يعني أن هناك احتمالًا قويًّا

أن تكون أم جميع العيون الحيوانية، وربما الحيوانات ككلٍّ، متمثلة في طحلب أخضر يمارس عملية البناء الضوئي.

هذا، بطبيعة الحال، يُثِير تساؤلًا: كيف بحق السماء وصل الرودوبسين الطحلبي إلى الحيوانات؟ من المؤكد أن طحلب الفولفوكس الجميل هذا ليس على خطٍّ وراثيٍّ مباشر مع الحيوانات. ولكن نظرة سريعة إلى تركيبة البقع العينية تُوحي على الفور بمفتاح هذا اللغز؛ فالرودوبسين مدفونٌ في أغشية بلاستيدات الكلوروفيل (تلك التراكيب الدقيقة في الطحالب والخلايا النباتية؛ المسئولة عن عملية البناء الضوئي). ومنذ مليار سنة، كانت أسلاف تلك البلاستيدات هي البكتيريا حرة المعيشة الممارسة لعملية البناء الضوئي، المسماة بالبكتيريا الزرقاء، التي التهمتها خلايا أكبر (انظر الفصل الثالث). وهذا يعني أن البقع العينية لا يقتصر وجودها على الفولفوكس بالضرورة. ولكن لها صلة ببلاستيدات الكلوروفيل، أو ربما أسلافها المسماة بالبكتيريا الزرقاء.[١١] وتُوجَد بلاستيدات الكلوروفيل في كثيرٍ من أنماط الخلايا الأخرى، بما فيها قليل من الحيوانات الأولية (وحيدة الخلية) التي يُعَدُّ بعضها ضمن الأسلاف المباشرة للحيوانات.

والحيوانات الأولية هي كائنات تتكوَّن كلٌّ منها من خلية واحدة متكاملة. وأكثر تلك الأوليات شهرةً هي الأميبا. كان رائد علم دراسات المجهر الهولندي أنتوني فان لوفنهوك أول من شاهدها، بالإضافة إلى فحص حيواناته المنوية، وقد أطلق عليها اسم الحييوينات (أي الحيوانات الصغيرة)؛ لتمييزها عن الطحالب المجهرية التي صنَّفَها مع النباتات باعتبارها نباتية بالأساس. ولكن هذا التقسيم أخفى وراءه العديد من الأخطاء؛ لأننا إذا استطعنا تكبير حجم بعضٍ من هذه الحييوينات الصغيرة حتى تصل إلى أحجام البشر، فسوف نُصعَق لمرأى مسوخ بشعة المنظر، نصف وحوش ونصف نباتات، وهي تحملق فينا، مثل لوحات الفنان الإيطالي آرسيمبولدو. وبألفاظ أكثر هدوءًا نقول إن بعض الحيوانات الأولية المتحركة التي تسبح متجولة سعيًا وراء فريستها تحتوي أيضًا على بلاستيدات كلوروفيل (مثل اليوجلينا)؛ مما يكسبها بعدًا طحلبيًّا، وحقًّا إنها اكتسبته بنفس الطريقة التي حدثت للطحالب بالضبط؛ وذلك عن طريق ابتلاع خلايا أخرى. أحيانًا ما تبقى هذه البلاستيدات تؤدي وظائفها؛ لتفي بالاحتياجات الغذائية لعائلها، ولكنها تتحلل في حالات أخرى، تاركة وراءها أغشيتها الخاصة وجيناتها المميزة، مثل ذكرى باهتة لماضٍ كان رائعًا، أو مثل قطع وأجزاء متنوِّعة في ورشة سمكري، كأساس لابتكار جديد؛ ابتكار قد يكون في شكل مثل العين. وهذا الكائن الهجين المجهري، وليس

الفولفوكس نفسه، هو نوع الكائن الذي يظن بعض الباحثين (ولا سيما فالتر جيرنج مرة أخرى) أنه قد يخفي في داخله أم جميع العيون الحيوانية.

فأي كائن هجين دقيق هذا؟ لا أحد من العلماء يعرف الإجابة، ولكن هناك دلائل وقرائن مُحيِّرة، وأمامنا الكثير لنتعلمه. إن بعض الحيوانات الأولية (الدينوسوطيات) تثير الدهشة باحتوائها على عيون دقيقة مُعقَّدة بها شبكية وعدسة وقرنية، كلها محتشدة في نفس الخلية. ويبدو أن هذه العيون نشأت من بلاستيدات كلوروفيل متحللة، وهي أيضًا تستخدم الرودوبسين. وهناك تساؤل مفتوح عمَّا إذا كانت العيون الحيوانية قد نشأت منها مباشرةً أم بشكل غير مباشر (من خلال عملية تكافلية) في هذا الكائن الصغير المليء بأشياء مهمة الذي لا يعرفه إلا القليلون. ولا يمكننا تحديد ما إذا كانت عملية تكوُّن العيون قد حدثت كخطوة متوقعة أم كمحض مصادفة؛ فهذا ما لا نعرفه. إلا أن هذا النوع من التساؤل، المحدد والشامل في الآن عينه، يقع في صميم العلوم، وآمل أن يلهم جيلًا صاعدًا يتطلع بعيونه إلى النجوم.

الفصل الثامن

الدم الحار

كسر حاجز الطاقة

تقول كلمات أغنية من أغنيات الأطفال إن الوقت يمر سريعًا حينما تكون سائقًا لقطار. أيضًا ما من أحد منا ينسى ذلك الشعور المناقض، شعور مرور دقائق كثيرة من الملل الذي يكاد يُوقِف العقل، وهو جالس في المقعد الخلفي للسيارة يسأل أباه مرة تلو الأخرى: «أَلَمْ نَصِلْ إلى وجهتنا بَعْدُ يا أبي؟» وأتخيَّل أن معظم القراء سيتذكَّرون أيضًا الضيق الذي كانوا يشعرون به وهم يشاهدون أجدادهم المسنين أو آباءهم وقد بطؤت حركتهم حتى صارت بسرعة السلحفاة، ثم يجلسون، بشكل غير مفهوم، والساعات تمر بهم كأنها دقائق. كلا النقيضين بعيدٌ جدًّا عن سرعة عالمنا الخاص، إيقاع حياتنا المعتدل بوصفنا بشرًا ناضجين.

لا نحتاج إلى عبقري كأينشتاين ليخبرنا أن الوقت نسبيٌّ. ولكن ما أثبته أينشتاين بوضوح بشأن الزمان والمكان نراه أكثر وقعًا، كما هو الحال دائمًا، في علم الأحياء. وكما قال الكاتب الساخر المشهور كليمنت فرويد: «إذا قررت أن تقلع عن التدخين أو الشراب أو الغرام؛ فهذا لا يعني أن عمرك سيطول بالضرورة، ولكن فقط يبدو عمرك وكأنه طال.»[1] إلا أن هناك شيئًا من المنطق الحقيقي في إسراع الوقت في مرحلة الطفولة وبطئه عند كبر السن. وهو يكمن في أوضاعنا ومشاعرنا الداخلية، وسرعة الأيض وسرعة دقات القلب وسرعة حرق الخلايا للغذاء في وجود الأكسجين. وحتى بين البالغين تُوجَد فروق شديدة بين مَنْ هو نَشِطٌ ومَنْ هو خامل. وأغلبنا يتقلَّب ببطء من أحد هذين النمطين إلى الآخر. وتعتمد سرعة إبطائنا، أو اكتسابنا لزيادة فعلية في الوزن، بدرجة كبيرة على

سرعة الأيض لدينا، التي تتفاوت بشكل طبيعي بين الأشخاص. وغالبًا ما نَجِد شخصين يأكلان نفس الطعام ويبذلان نفس المجهود ولكنهما يختلفان في ميلهما لحرق السعرات أثناء الراحة.

ما من موضع تتجلَّى فيه أهمية المعدل الأيضي أكثر من الفارق بين الكائنات ذات الدم الحار والكائنات ذات الدم البارد. صحيحٌ أنَّ هذين اللفظين يُثِيران اعتراض علماء الأحياء، إلا أنهما لفظان مفعمان بالحيوية والمعاني الواضحة لغالبية الناس، ويُوصلان المعاني المطلوبة تمامًا مثلما تفعل الألفاظ التقنية المقابلة المعقَّدة مثل ثبات الحرارة وتغيُّر الحرارة (المقابلين للدم البارد والدم الحار على الترتيب). إنه لأمر يثير الاهتمام، ولكني لاحظت أن هناك أوجهًا قليلة في علم الأحياء نشعر حيالها بالتعصُّب الزائد نحن أصحاب الدم الحار. ومن الصعب تبرير ذلك الغضب الذي يظهر في الدوريات وعلى شبكة الإنترنت عند الحديث عن الديناصورات وعمَّا إذا كانت في زمانها من ذوات الدم الحار أم البارد؛ فيبدو أن هناك فارقًا انفعاليًّا، ربما كانت له علاقة باعتزاز البشر بأنفسهم، بين تعرُّض أسلاف البشر للالتهام من جانب تلك العظايا العملاقة، أو من جانب وحوش ماهرة ماكرة سريعة الحركة كان علينا أن نبذل أقصى ما في وسعنا كي نظل أحياء في وجودها. يبدو أننا معشر الثدييات ما زلنا نحمل في قلوبنا الضغينة والمرارة بسبب ما قضاه أسلافنا من الحيوانات الصغيرة ذات الفراء في كهوف وجحور تحت الأرض منكمشين ومرتعدين خوفًا من المفترسات الشرسة الكبيرة التي كانت سائدة في الزمن الماضي. ولكن هذا حدث من ١٢٠ مليون عام، وهو وقت طويل جدًّا وفق أي حساب.

إن ما يُسمَّى الدم الحار إنما يتعلَّق أساسًا بسرعة الأيض، وبسرعة إيقاع الحياة. إن خاصية الدم الحار تُفِيد في حد ذاتها؛ إذ تسرع جميع التفاعلات الكيميائية مع تزايد درجة الحرارة، بما فيها التفاعلات الكيميائية الحيوية التي تدعم الحياة. وعلى امتداد ذلك النطاق المحدود من درجات الحرارة ذات الدلالة البيولوجية من حوالي صفر إلى ٤٠ درجة مئوية في الحيوانات نَجِد الفارق في الأداء الوظيفي شديدًا؛ إذ يتضاعف استهلاك الأكسجين، على سبيل المثال مع كل زيادة قَدْرها ١٠ درجات مئوية في درجة الحرارة في هذا المدى؛ وهو ما يعني زيادة في النشاط والقوة. ومن ثم يكون لدى حيوان ما درجة حرارته ٣٧ درجة مئوية ضعف قوة حيوان آخر درجة حرارته ٢٧ درجة مئوية، وأربعة أضعاف قَدْر قوة حيوان درجة حرارته ١٧ درجة مئوية.

لكن نجد إلى حدٍّ بعيد أن درجة الحرارة لا تلتزم بهذا النظام في كل الأحوال. فالحيوانات ذوات الدم الحار ليست بالضرورة أكثر حرارةً من ذوات الدم البارد؛ فمعظم

الزواحف بارعة في امتصاص الطاقة من الشمس، فتدفئ أجسامها وترفع درجة حرارتها الداخلية إلى مستويات مماثلة للطيور والثدييات. من المؤكَّد أنها لا تحافظ على درجة الحرارة المرتفعة هذه بعد حلول الظلام، ولكن لا تَنْسَ أنَّ الطيور والثدييات غالبًا ما تكون خاملة بالليل كذلك. بل ربما تقتصد في الطاقة أيضًا بخفض درجة حرارتها الداخلية، ولكنها نادرًا ما تفعل هذا، أو على الأقل لا تفعل هذا كثيرًا (وإن كانت طيور الطنان كثيرًا ما تدخل في حالة غيبوبة لتحافظ على طاقتها). وفي عصرنا هذا الذي صرنا فيه أكثر وعيًا بقضايا الطاقة، قد تدفع الثدييات المهتمين بالبيئة إلى البكاء؛ إذ نَجِد منظم درجات حرارة الجسم في المخ مضبوطًا عند ٣٧ درجة مئوية، على مدى ٢٤ ساعة يوميًّا، سبعة أيام أسبوعيًّا، بغضِّ النظر عن الاحتياجات. ولا تَسَلْ عن الطاقة البديلة؛ فنحن لسنا ممن يمتصون طاقة الشمس كالعظايا، ولكننا نولِّد الحرارة بشكل مدهش عن طريق محطات توليد الطاقة الحارقة للكربون داخليًّا؛ مما يجعلنا نُخلِّف آثارًا كربونية عملاقة أيضًا. ومن ثم فالثدييات هي الكائنات الأصلية المستنزفة للبيئة.

وقد تظن أن استمرار الثدييات بأقصى طاقتها خلال الليل يعطيها دفعة لبدء العمل في الصباح، إلا أن العظايا لا تضيع الكثير من الوقت في رفع درجات حرارتها لتعود إلى مستويات النشاط المطلوبة. فالعظاءة عديمة الأذنين، على سبيل المثال، لديها جيب دموي في أعلى رأسها، يمكنها من خلاله تدفئة جسمها بكامله سريعًا. وفي الصباح، تطل برأسها خارج جحرها، وتتطلع بعينين حذرتين خوفًا من وجود حيوانات مفترسة؛ لتكون على استعداد للعودة سريعًا إلى جحرها عند الضرورة، وبعد نصف ساعة يكون جسمها في الغالب قد صار دافئًا لدرجة تكفي لكي تغامر بالخروج من الجحر، وإنها لطريقة آمنة تبدأ بها يومها. بطبيعة الحال الانتقاء الطبيعي لا يقنع بوجود وظيفة واحدة لأي سمة. فبعض العظايا، إذا وقعت في الأسر أو أمسك بها حيوان مفترس، تستخدم وسيلة دفاعية هي وصلة من الجيب الدموي برأسها إلى جفنيها؛ ومن خلال الجفنين يمكنها بخُّ الدم على مفترسات، مثل الكلاب، حتى تجد طعمها كريهًا فتلفظها.

كما أن حجم الجسم وسيلة أخرى للحفاظ على درجات حرارة الجسم المرتفعة. لا حاجة بك لأن تكون صيادًا رائعًا ذكيًّا حتى تتخيَّل جلدي حيوانين مفترسين كبساطين على الأرض. تخيَّل أن أحد الجلدين طوله وعرضه مثل الجلد الآخر مرتين؛ فهذا يعني أن الحيوان الأكبر حجمًا جلده أكبر من جلد الحيوان الآخر بأربعة أضعاف (٢ × ٢ = ٤)، ولكنه يكون أثقل بثمانية أضعاف؛ إذ إن جسمه أكثر عمقًا بمرتين (٢ × ٢ × ٢ = ٨).

ومن ثم فإن كل مضاعفة للأبعاد تنقص النسبة بين مساحة سطح الجسم إلى وزنه بمقدار النصف (٤ ÷ ٨ = ٠٫٥). وإذا افترضنا أن كل رطل من وزن الجسم يُولِّد نفس القَدْر من الحرارة، فإن الحيوانات الأكبر حجمًا تُولِّد المزيد من الحرارة الداخلية؛ نظرًا لأنها تحمل في أجسامها المزيد من الأرطال.[٢] في نفس الوقت، فإنها تفقد الحرارة ببطء أكثر؛ لأن أسطح أجسامها تكون أصغر نسبيًّا (بالنسبة للحرارة الداخلية المتولدة). وهكذا، كلما كان الحيوان أكبر حجمًا، كان أكثر حرارة. وعند حدٍّ ما، تصير الحيوانات ذوات الدم البارد من ذوات الدم الحار. فالتماسيح الضخمة، على سبيل المثال، تُعتَبَر من الناحية العلمية من ذوات الدم البارد، ولكنها تحفظ في أجسامها قَدْرًا من الحرارة يكفي لجعلها على الخط الفاصل لذوات الدم الحار. وحتى أثناء الليل، لا تنخفض حرارتها الداخلية إلا بدرجات قليلة، بالرغم من إنتاجها للقليل من الحرارة الداخلية.

من الواضح أن الكثير من الديناصورات لا بد أنها تجاوزت عتبة الحجم هذه بقدرٍ كافٍ؛ مما يجعلها — في واقع الأمر — من ذوات الدم الحار، لا سيما وهي تتمتع بدرجات الحرارة البيئية الدافئة التي كانت تسود جزءًا كبيرًا من كوكب الأرض في تلك العصور المزدهرة. فلم تكن ثمة جبال جليدية، على سبيل المثال، حينئذ، كما كانت مستويات ثاني أكسيد الكربون الجوي أعلى بعشرة أضعاف مما يُوجَد اليوم. بتعبير آخر نقول إن بعض المبادئ الجسمانية البسيطة تعني أن الكثير من الديناصورات لا بد أنها كانت من ذوات الدم الحار بغضِّ النظر عن حالتها الأيضية. بل إن الديناصورات العملاقة التي كانت نباتية الغذاء ربما كانت تجد صعوبة أكثر في فقدان الحرارة مما تجده في اكتسابها. كما أن بعض التراكيب التشريحية الغريبة — مثل الصفائح الدرعية الهائلة التي كانت تُغطِّي جسم الأستيجوصورس — ربما كانت تلعب دورًا ثانويًّا في تبديد حرارة الجسم، دورًا لا يختلف كثيرًا عن دور أذنَيِ الفيل.

لكن لو كان الأمر بهذه البساطة، لما كان ثمة خلاف حول ما إذا كانت الديناصورات من ذوات الدم الحار أم لا؛ فقد كانت كذلك بالتأكيد بهذا المفهوم المحدود، أو على الأقل كان الكثير منها كذلك. والذين يُغرَمون بالألفاظ الرنانة نقول لهم إن هذه الظاهرة يُطلَق عليها اسم «الاحتفاظ بالحرارة بالقصور الذاتي». فلم تكن تلك الحيوانات تحافظ على ارتفاع درجة حرارة أجسامها الداخلية فحسب، بل كانت تُولِّد الحرارة داخليًّا بنفس الطريقة التي تحدث في الثدييات الحديثة، من خلال حرق الكربون. إذن كيف لا تُعتَبَر الديناصورات، بالمعنى الأوسع نطاقًا، من ذوات الدم الحار؟ حسنًا؛ إن بعضها قد ينطبق

عليه هذا حقًّا كما سنرى لاحقًا. ولكن لكي نفهم التفرد الحقيقي للثدييات أو الطيور بالدم الحار، يلزمنا أن نقوم بعكس الاتجاه الحجمي لنرى ما يحدث في الحيوانات الأصغر حجمًا التي دون «عتبة الدم الحار».

تفكَّرْ في العظاءة. هي من ذوات الدم البارد، بمعنى أنها لا تستطيع أن تحافظ على حرارة جسمها الداخلية على مدار الليل. وبينما يستطيع التمساح الكبير أن يقترب من هذا الهدف على الأرجح، فإن الحيوان كلما كان أصغر حجمًا كان من الأصعب عليه أن يُحقِّقه. أما عزل جسم الحيوان حراريًّا بالفراء أو الريش فلا يفيد إلا إلى حدٍّ معيَّن، ويمكن بالفعل أن يعوق امتصاص الحرارة من البيئة المحيطة. فإذا جرَّبْنا أن نُلبس عظاءةً معطفًا من الفراء (ولا حاجة بنا أن نقول إن بعض الباحثين الجادِّين فعلوا هذا بالضبط)، فسنجد أن العظاءة تزداد برودة باستمرار، ولا يمكنها أن تمتص حرارة الشمس كذلك، ولا أن تولِّد ما يكفي من حرارة داخلية في جسمها لتعوِّض النقص. وهذا بعيدٌ عما يحدث في الثدييات أو الطيور، وهذا يَجُرُّنا إلى التعريف الحقيقي للدم الحار.

تُولِّد أجسام الثدييات والطيور قَدْرًا من الحرارة الداخلية يَصِل إلى عشرة أضعاف أو خمسة عشر ضعف ما تولِّده عظاءة متوسطة الحجم. وهذا يحدث بغضِّ النظر عن الظروف المحيطة. فإذا وضعت عظاءة وحيوانًا ثدييًّا في جو شديد الحر، فستجد أن جسم الحيوان الثديي يستمر في توليد الحرارة الداخلية في جسمه قَدْرَ عشرة أضعاف ما يُولِّده جسم العظاءة، حتى يُصاب بالضرر ويكاد يهلك. وسيُضطَر للخروج من هذا الجو ليبرد جسمه؛ بأن يشرب الماء أو يأخذ حمَّامًا، أو يلهث، أو يلجأ إلى الظل أو يستخدم المروحة أو يشرب مشروبًا باردًا، أو يستخدم مكيف الهواء. أما العظاءة فستستمتع بهذا الجو. فلا غرو أن نجد العظايا والزواحف عامةً تَطِيب معيشتها في الصحاري والأجواء الحارة.

والآن جرِّب وضع العظاءة والحيوان الثديي في أجواء باردة، وليكن قريبًا من درجة التجمُّد، حينئذٍ ستدفن العظاءة نفسها في أوراق الشجر، وتكوِّر جسمها وتذهب في نوم عميق. وللحقِّ نقول إن الكثير من الثدييات الصغيرة تفعل هذا أيضًا، ولها العذر في ذلك. ولكن الوضع المعتاد للثدييات هو العكس تمامًا؛ فإننا حينئذٍ نحرق المزيد من السعرات من الطعام. إن تكلفة المعيشة بالنسبة لحيوان ثديي في الجو البارد تزيد مائة ضعف عن تكلفتها بالنسبة للعظاءة. وحتى في الأجواء معتدلة البرودة، وليكن حوالي ٢٠ درجة مئوية (أي في يوم ربيعي معتدل في جزء كبير من القارة الأوروبية) يكون الفارق هائلًا؛ حوالي ثلاثين ضعفًا. ولدعم سرعة الأيض الهائلة هذه، يتعيَّن على الحيوان الثديي أن

يحرق الطعام بما يزيد ثلاثين ضعفًا عمَّا يحرقه الحيوان الزاحف. وينبغي أن يأكل في يوم واحد، وفي كل يوم، قَدْر ما تأكله العظاءة في شهر كامل. فإذا وضعنا في الاعتبار أنه لا يُوجَد غذاء مجاني، فإن التكلفة حينئذٍ تكون عالية حقًّا.

هكذا تجري الأمور، فتكلفة أن يكون الحيوان من الثدييات أو الطيور تبدأ من حوالي عشرة أضعاف تكلفة أن يكون عظاءة، وغالبًا ما تكون أعلى بكثير. فما الذي نَجْنِيه من نمط حياتنا هذا ذي التكلفة العالية؟ الإجابة واضحة هي توسيع نطاق البيئة الملائمة؛ ففي حين أن الدم الحار قد لا يُفِيد في شظف البيئة الصحراوية، فإنه يُتِيح السعي الليلي في طلب الرزق أو الوجود النشط على مدار الشتاء في الأجواء المائلة للبرودة، وكلا الأمرين لا تستطيعه العظايا. ثمة ميزة أخرى وهي القدرة المخية، وإن كان من الصعب عليَّ أن أفهم السبب في وجوب أن تكون هناك علاقة ضرورية. لا شك أن الثدييات لديها مخاخ أكبر حجمًا بالنسبة لأحجام أجسامها، تليها الزواحف. وإذا كان كِبَر حجم المخ ليس ضمانًا ضروريًّا للذكاء في رأيي، ولا حتى لسرعة البديهة، فإنه يبدو أن سرعة الأيض تُعَدُّ دعمًا قويًّا لمخ أكبر حجمًا، دون أن يتم تخصيص الموارد له بالتحديد. ومن ثم، إذا كان يتم في أجسام كلٍّ من العظايا والثدييات تخصيص حوالي ٣ بالمائة من الموارد للمخ، ولكن لدى الثدييات وتحت تصرُّفها موارد تزيد على عشرة أضعاف ما لدى العظايا، فيمكنها أن تفي باحتياجات مخاخ تزيد عن مخاخ العظايا بعشرة أضعاف، وعادةً ما يكون لديها هذا بالفعل. وعلى قمة الثدييات نَجِد أن الرئيسيات، ولا سيما البشر تُخصَّص لديها نسبة كبيرة من مواردها للنشاط المخي. ففي البشر، على سبيل المثال، تُخصَّص نسبة ٢٠ بالمائة تقريبًا من الموارد للمخ، مع أن المخ لا يُمثِّل سوى نسبة صغيرة من الجسم. ولذا فإنني أشك أن تكون الطاقة المخية الزائدة ليست أكثر من إضافة زائدة للإنسان تحقَّقَتْ دون تكلفة إضافية، لأجل أسلوب حياة كائن ذي دم حار. فهناك طرق أقل تكلفة لبناء مخاخ أكبر حجمًا.

باختصار، إن توسيع الملاءمة البيئية والنشاط الليلي والقدرة المخية الإضافية كلها أمور لا تبدو كعائد مُجْزٍ في مقابل التكاليف الأيضية الباهظة للدم الحار. يبدو لي أن ثمة شيئًا مفقودًا في هذا الصدد. ففي الجانب المدين (أي جانب العيوب إذا صحَّ التعبير) هناك تكلفة الأكل، ثم الأكل، ثم الأكل، حتى التخمة. وهناك تكلفة الوقت والجهد المبذولين في التجوُّل طلبًا للرزق أو الصيد أو حصاد الزرع، والوقت الذي يُقضَى في الهرب من المفترسات أو مواجهة المنافسين. وهكذا يُستهلَك الطعام ويبدأ في النضوب. فمن الواضح

أنك كلما أسرعت في الأكل، أسرع طعامك في النفاد. وكذلك يقل عدد السكان. فثمة قاعدة عملية تقول إن معدل الأيض يتحكَّم في عدد السكان، وغالبًا ما يَصِل عدد الزواحف إلى عشرة أضعاف أعداد الثدييات. ولنفس السبب يكون عدد ذرية الثدييات أقل (وإن كان باستطاعتها أن تخصص المزيد من الموارد لهذا العدد الأقل). وحتى مدة الحياة المتوقعة تختلف باختلاف سرعة الأيض. ولقد كان كليمنت فرويد محقًّا بشأن البشر ومخطئًا بشأن الزواحف. فربما كانت حياتها بطيئة ومملة، ولكنها أطول، ولا سيما السلاحف العملاقة التي تصل أعمارها إلى مئات السنين.

وهكذا يفرض الدم الحار ضريبة قاسية؛ إذ يُبشِّر بحياة أقصر، يقضيها الحيوان في الأكل بشراهة ضارة، ويُقلِّل عدد السكان وعدد النسل، وهما عاملان يجب ألا يغفلهما الانتقاء الطبيعي. وتعويضًا عن هذا نَجِد في الجانب الدائن (أي جانب المزايا) أن يكون لدى الحيوان فرصة السهر ليلًا طلبًا للرزق وتحمُّل الجو البارد. ولكني أرى أنها أمور ليست عظيمة القيمة. فإننا ننام في كل الأحوال. ولكننا في رؤيتنا للحياة عادةً ما نضع الثدييات والطيور في أعلى مرتبة في عالم الحيوان. فما الذي نمتلكه نحن ولا تمتلكه الزواحف؟ يجدر به أن يكون شيئًا قيِّمًا.

إن أقوى إجابة عن هذا السؤال هي «القدرة على التحمل»؛ إذ يمكن أن تجاري العظايا الثدييات بسهولة في سرعتها أو قوة عضلاتها، بل يمكن أن تتجاوزها في سرعتها في المسافات القصيرة، ولكنها سرعان ما تُصاب بالإنهاك. فإذا أمسكت بعظاءة فستفلت من يدك وتختفي عن الأنظار في لمح البصر لتلجأ إلى أقرب جحر يمكنها الاختباء فيه. ولكنها حينئذٍ تستريح، ربما لساعات، حتى تتعافى من الإجهاد ببطء شديد مع شعورها بالألم. ومشكلة تلك الزواحف أنها غير مهيئة جسديًّا لأن تبقى مرتاحة، ولكنها مهيئة للسرعة.[٣] وهي مثل البشر من عدَّائي المسافات القصيرة في اعتمادها على التنفُّس اللاهوائي؛ بمعنى أنها لا تأبه بالتنفُّس أثناء بذل الجهد، ولكنها لا تستطيع كتم أنفاسها فترة طويلة، وأجسامها تُولِّد الطاقة (في شكل ثلاثي فوسفات الأدينوسين) بسرعة هائلة ولكنها تستخدم في ذلك عمليات تُسبِّب إعاقة لبذل الجهد العضلي بعد فترة بسبب تراكم حمض اللاكتيك؛ مما يسبب إصابتها بالتقلصات العضلية.

ويكمن الفارق بين الزواحف والثدييات في هذا الصدد في التركيبة العضلية. فهناك أنماط مختلفة من العضلات، كما رأينا في الفصل السادس. وهي تتفاوت من حيث

التوازن بين ثلاثة مكوِّنات رئيسية: الألياف العضلية، والشعيرات الدموية، والميتوكوندريا. وباختصار نقول: إن الألياف العضلية تنقبض لتولِّد القوة، والشعيرات الدموية تمد بالأكسجين وتزيل النفايات، بينما تقوم الميتوكوندريا بحرق الطعام بالأكسجين لإنتاج الطاقة الضرورية للانقباض. والمشكلة أن كلًّا من هذه العناصر الثلاثة تشغل حجمًا مهمًّا ومؤثرًا، وهكذا إذا زادت كمية الألياف العضلية قَلَّ الحجم المتاح للشعيرات الدموية أو للميتوكوندريا. والعضلة المكدَّسة بالألياف تتمتَّع بقوة هائلة، ولكنها سرعان ما تفتقد الطاقة اللازمة للانقباض. إنه اختيار ذو عواقب واسعة النطاق؛ فإما قوة عالية مع درجة تحمُّل ضعيفة، وإما قوة منخفضة مع درجة تحمُّل عالية. ولْتُقارِنْ بين عدَّاء للمسافات القصيرة ذي عضلات ضخمة، وبين عدَّاء للمسافات الطويلة أو الماراثون، ذي عضلات ضامرة، وستكتشف الفارق.

إن لدينا جميعًا خليطًا من الأنماط العضلية، ويتفاوت هذا الخليط باختلاف الظروف والأحوال، وما إذا كنَّا، على سبيل المثال، نعيش بمستوى سطح البحر أو في أعالي الجبال. كما يمكن أن يُحقِّق أسلوب المعيشة فارقًا كبيرًا. فإذا تمرنت لتكون عدَّاء للمسافات القصيرة فسوف تتكوَّن في جسمك عضلات ضخمة سريعة الانقباض فيها الكثير من القوة والقليل من درجة التحمُّل. وإذا تمرنت لتكون عداء للمسافات الطويلة فسيحدث العكس. ولأن هذه الفروق تتفاوت بشكل طبيعي بين الأفراد والسلالات البشرية، فإنها تكون عرضة للانتقاء الطبيعي على مدى أجيال، إذا حتَّمَت الظروف ذلك. ولهذا السبب نَجِد بين سكان نيبال وشرق أفريقيا وجبال الأنديز صفات وراثية كثيرة مشتركة، وهي صفات جعلتهم يعتادون ويتأقلمون مع الحياة في المناطق المرتفعة. بينما تكون أوزان سكان المناطق المنخفضة أثقل وعضلاتهم أضخم.

وفي بحث كلاسيكي أجراه عام ١٩٧٩ كلٌّ من ألبرت بنيت وجون روبن اللذين كانا حينئذٍ بجامعة كاليفورنيا، بمدينة إرفين، يقول الباحثان إن تلك الفروق تكمن في أساس فكرة الدم الحار. لا يتعلَّق الأمر بدرجات الحرارة، بل يتعلَّق الفرق بين الكائنات ذوات الدم الحار وذوات الدم البارد بقابلية التحمُّل أساسًا. وتعرف فكرتهما بفرضية «القدرة الهوائية»، وحتى إذا لم تكن تلك الفرضية صحيحة تمامًا فإنها غيَّرَت الطريقة التي كان يفكر بها المهتمون بهذا المجال في الحياة.

تنقسم فرضية القدرة الهوائية إلى افتراضين اثنين. أولهما أن الانتقاء الطبيعي غير معنيٍّ بدرجة الحرارة ولكن بزيادة النشاط الذي يكون مفيدًا بشكل مباشر في كثير من الأحوال. وكما قال بنيت وروبن أنفسهما:

إن المزايا الانتقائية لزيادة النشاط ليست شيئًا خفيًّا، بل هي أساسية للبقاء والتكاثر. والحيوان الذي يتمتَّع بقدرة أكبر على التحمُّل تكون لديه ميزة يمكن إدراكها بسهولة من الناحية الانتقائية؛ إذ يمكنه أن يتحمل درجات أكبر من التعقب والسعي، أو الطيران والانطلاق لجمع الطعام أو تجنُّب الوقوع فريسة للأعداء. كما يكون أفضل في الدفاع عن مناطق النفوذ أو غزو مناطق أخرى. ويكون أكثر نجاحًا في مغازلة الإناث والتزاوج.

كل هذا يبدو أمرًا غير قابل للنقاش. ثم قدَّمَ عالم بولندي في علم الحيوان يُدعَى باول كوتيجا تنقيحًا لهذه الفكرة يثير الاهتمام؛ إذ يضع التركيز في الرعاية الأبوية المركزة، المصحوبة بإطعام الصغار لشهورٍ أو سنوات؛ مما يفصل الثدييات والطيور عن الحيوانات ذوات الدم البارد. يتطلب هذا التخصيص قدرة قوية جدًّا على التحمل ويمكن أن يكون له أثر كبير في بقاء الحيوان حيًّا في أشد أوقات حياته ضعفًا. وبغضِّ النظر عن الأسباب المحددة، فإن الجزء الثاني من فرضية القدرة الهوائية هو الأكثر إثارة للتفكير والاهتمام. ونعني بهذا الرابط بين قدرة التحمل والراحة؛ إذ يقول بنيت وروبن إنه يُوجَد ارتباط ضروري بين سرعة الأيض القصوى وسرعته عند الراحة. دعني أشرح لك هذا.

تُعرف سرعة الأيض القصوى بأنها كمية الأكسجين المستهلكة عند أقصى سرعة لنا، تلك السرعة التي لا نستطيع أن نزيد عنها. وهي تعتمد على أشياء كثيرة، منها اللياقة البدنية، والجينات الوراثية بطبيعة الحال. ومن ثم، تعتمد سرعة الأيض القصوى على معدل استهلاك الأكسجين من قبل تلك البنى التي تُعتبَر آخر من يستخدم الأكسجين: الميتوكوندريا التي في العضلات. فكلما أسرعت في استهلاك الأكسجين، كانت سرعة الأيض القصوى أكبر. ولكن حتى التفكير المتعجل يجعل من الواضح أنه تُوجَد عوامل كثيرة لا بد من اشتراكها، وكلها عوامل مترابطة؛ إذ تعتمد سرعة الأيض القصوى على عدد الميتوكوندريا، وعدد الشعيرات الدموية التي تغذيها، وضغط الدم، وحجم القلب وبنيته، وعدد خلايا الدم الحمراء والتركيبة الجزيئية المحددة للصبغ الناقل للأكسجين (وهو الهيموجلوبين)، وحجم الرئتين وبنيتهما، وقطر القصبة الهوائية، وقوة عضلة الحجاب الحاجز. وهكذا. فإذا اختلَّ أو نقص أيٌّ من هذه العوامل أو المظاهر، فستنخفض سرعة الأيض بالتبعية.

وهكذا، يتساوى الانتقاء المؤيد لدرجة التحمل مع الانتقاء المؤيد لارتفاع سرعة الأيض القصوى؛ وهذا ينتهي بنا إلى انتقاء مجموعة كاملة من الخصائص التنفسية.[٤]

وحسبما قال بنيت وروبن فإن سرعة الأيض القصوى المرتفعة ترفع إلى حدٍّ ما سرعة الأيض عند الراحة. وبتعبير آخر: فإن الكائن الثديي شديد النشاط الذي يتمتَّع بقَدْر كبير من درجة التحمُّل تكون لديه سرعة أيض مرتفعة بغير داعٍ؛ إذ يستمر في استنشاق الكثير من الأكسجين حتى وهو راقد قد لا يفعل شيئًا على الإطلاق. وقد بيَّن العالمان تلك الحالة بشكل تجريبي، وقالا: أيًّا كان السبب، فإن سرعة الأيض القصوى لدى جميع الحيوانات، سواء أكانت من الثدييات أم الطيور أم الزواحف، تميل لأن تكون أكبر بحوالي عشرة أضعاف سرعة الأيض عند الراحة. وهكذا فإن الانتقاء المؤيد لارتفاع سرعة الأيض القصوى يرفع معه سرعة الأيض عند الراحة أيضًا. فإذا ارتفعت سرعة الأيض القصوى إلى عشرة أضعاف، وهو الفارق المسجل بين الثدييات والعظايا، فإن سرعة الأيض عند الراحة ترتفع كذلك إلى عشرة أضعاف. وعند ذلك المستوى يولِّد الحيوان حرارة داخلية كبيرة، وهو ما يجعله حيوانًا «ذا دم حار».

هذه الفكرة تُثِير الارتياح في النفس، وتبدو منطقية، ولكن إذا فحصناها عن قرب فسنجد من الصعب كثيرًا أن ندرك السبب في ضرورة وجود ارتباط بين الأمرين. فسرعة الأيض القصوى تُعنى أساسًا بتوصيل الأكسجين إلى العضلات، ولكن في حالة الراحة لا تسهم العضلات في استهلاك الأكسجين إلا بالقليل. وعلى العكس من هذا، يلعب المخ والأعضاء الحشوية — مثل الكبد والبنكرياس والكليتين والأمعاء ... إلخ — الدورَ الأكثر أهمية. وليس واضحًا تمامًا السبب في احتياج الكبد لاستهلاك الأكسجين بكميات كبيرة لمجرد أن العضلات تحتاج لذلك. ومن الممكن على الأقل تخيُّل حيوان تكون لديه قدرة هوائية عالية جدًّا وسرعة أيض عند الراحة منخفضة جدًّا، وسيكون هذا عظاءة زائدة القوة، تجمع بين أفضل ما في الأمرين. وقد يكون هذا هو بالضبط ما كانت عليه الديناصورات القديمة. إنه لشيء مثير للإحراج في واقع الأمر أننا ما زلنا نجهل السبب في أن سرعتَي الأيض القصوى وعند الراحة تَمِيلان للارتباط معًا في الحيوانات المعاصرة من الثدييات والزواحف والطيور، أو ما إذا كان هذا الارتباط يمكن كسره في بعض الحيوانات.[٥] من المؤكَّد أن الثدييات شديدة النشاط جدًّا، مثل الظبي ذي القرن الشوكي، تكون لديها قدرات هوائية عالية جدًّا، أعلى من سرعات الأيض لديها عند الراحة بحوالي خمسة وستين ضعفًا؛ مما يُوحِي بإمكان فَصْل الارتباط بين الاثنين. ونفس الشيء ينطبق على قليل من الزواحف؛ فالتمساح الأمريكي (القاطور) على سبيل المثال، لديه قدرة هوائية تَفُوق سرعة الأيض لديه عند الراحة بما لا يقل عن أربعين مرة.

ومع كل ما سبق، فلا يزال ثمة أسباب وجيهة تجعلنا نعتقد أن بنيت وروبن على حق. وربما أقواها يتعلَّق بمصدر الحرارة في معظم الحيوانات ذوات الدم الحار؛ فهناك طرق كثيرة لتوليد الحرارة مباشرةً، ولكن أغلب الحيوانات ذوات الدم الحار لا تأبه بها؛ إذ يُعَدُّ إنتاجها للحرارة نتيجة غير مباشرة للأيض. والثدييات صغيرة الحجم التي تفقد حرارتها سريعًا، مثل الجرذان، هي وحدها التي تُولِّد الحرارة مباشرةً. فالجرذان (وصغار الكثير من أنواع الثدييات الأخرى) تستخدم نوعًا من الأنسجة المتخصصة يُعرَف بالدهن البني، وهو يكتظ بالميتوكوندريا «الحارة». والحيلة التي تستخدمها بسيطة، ففي الأحوال العادية تُولِّد الميتوكوندريا تيارًا كهربائيًّا يتكوَّن من البروتونات عَبْر أغشيتها، وهذا يُستخدَم لتوليد ثلاثي فوسفات الأدينوسين، الذي يُعَدُّ عُملة الطاقة بالنسبة للخلية (انظر الفصل الأول). وتتطلَّب هذه الآلية بكاملها أغشية ميتوكوندرية سليمة لتعمل كمادة عازلة. وأي تسرب في هذه الأغشية يُسبِّب قصرًا في الدوائر الكهربية لتيار البروتونات؛ مما يؤدِّي إلى تبديد طاقته في هيئة حرارة. وهذا هو بالضبط ما يحدث في الدهن البني؛ إذ تُوجَد ثغور بروتينية بشكل مقصود في أغشية الميتوكوندريا؛ مما يجعلها قابلة للتسريب. لذلك تُولِّد هذه الميتوكوندريا الحرارةَ بدلًا من ثلاثي فوسفات الأدينوسين.

إذن، إذا كانت الحرارة هي الهدف الأوَّلي، فإن الحل هو الميتوكوندريا القابلة للتسريب. فإذا جُعِلَتِ الميتوكوندريا كلها قابلةً للتسريب بمعنى الكلمة، كما في الدهن البني، فإن كل الطاقة في الطعام ستتحوَّل إلى حرارة بشكل مباشر. وهي عملية بسيطة وسريعة، ولا تتطلب فراغًا كبيرًا؛ إذ يمكن أن تُولِّد كميةٌ قليلةٌ من النسيج حرارةً بكفاءة. ولكن ليس هذا هو ما يحدث في الأحوال العادية؛ فهناك فرق ضئيل في درجة التسريب الميتوكوندري بين العظايا والثدييات والطيور. وخلافًا لهذا، يكمن الفارق بين الكائنات ذوات الدم البارد وذوات الدم الحار في أغلبه في أحجام الأعضاء الداخلية وعدد الميتوكوندريا. فمثلًا يكون كبد الجرذ أكبر كثيرًا من كبد عظاءة مساوية له في حجم الجسم. ويكون مكدَّسًا بقدر أكبر بكثير من الميتوكوندريا. وبتعبير آخر نقول: إن الأعضاء الحشوية للكائنات ذوات الدم الحار تُشحَن شحنًا سريعًا بكفاءة عالية. وهي تستهلك كميات هائلة من الأكسجين، ليس لتوليد الحرارة مباشرةً، ولكن لحفز الأداء الوظيفي. وتُعَدُّ الحرارة حينئذٍ مجرد ناتج ثانوي يتم التقاطه فيما بعد ليُستخدَم بشكل جيد، مع نشوء عوامل جيدة للعزل الخارجي، مثل فراء الثدييات وريش الطيور.

ويمنح ظهور خاصية الدم الحار في مسيرة تطور الحيوانات اليوم دعمًا للفكرة القائلة إن خاصية الدم الحار تتعلَّق بالشحن السريع للأعضاء الحشوية أكثر ممَّا تتعلَّق بإنتاج الحرارة. ولقد بدأ العالم الفسيولوجي التطوري فرانك سيباخر بجامعة سيدني دراسة الجينات التي تدعم ظهور خاصية الدم الحار في أجنة الطيور، ووجد أن جينًا مما تُسمَّى «الجينات المسيطرة»، (الذي يشفِّر بروتينًا يُسمَّى PGC1α) يقوم بتنشيط الأعضاء الحشوية بحفز ما فيها من الميتوكوندريا على التكاثر. كما يمكن التحكُّم أيضًا في حجم العضو الحشوي بسهولة، وذلك بضبط التوازن بين تضاعف الخلية وموتها، عن طريق «جينات مسيطرة» مشابهة. وخلاصة القول إن الشحن السريع للأعضاء ليس صعبًا من الناحية الجينية، بل يمكن التحكم به بقليل فقط من الجينات. إلا أنه مكلِّف للغاية من منظور الطاقة، ولن يتم تعزيزه انتقائيًّا إلا إذا كان العائد يستحق ذلك.

وهكذا يبدو السيناريو العريض لفرضية القدرة الهوائية مُقْنِعًا. لا شك أن الحيوانات ذوات الدم الحار لديها قدرة على التحمُّل أكثر بكثير من ذوات الدم البارد، ولديها نمطيًّا قدرة هوائية تزيد على عشرة أضعاف. وفي كلٍّ من الثدييات والطيور، يقترن بهذه القدرة الهوائية المرتفعة جدًّا أيض مشحون شحنًا سريعًا عند الراحة — أي وجود أعضاء حشوية كبيرة بها قوة ميتوكوندرية عالية — مع قليل من التوليد المتعمد للحرارة. وبالنسبة لي على الأقل، يبدو منطقيًّا أن القدرة الهوائية العالية يجب أن تقترن بمنظومة داعمة ومنشطة. وهذه الفكرة يمكن اختبارها بسهولة؛ فإذا تم إحداث قدرة هوائية عالية، فيجب أن تتبعها سرعة الأيض عند الراحة بشكل متناسب. وعلى أقل تقدير، يجب أن يتوافق الاثنان، حتى إذا كان من الصعب إثبات العلاقات السببية.

لكن هنالك مشكلة. فمنذ أن قُدِّمَتِ الفرضية منذ ثلاثين عامًا، جَرَتْ محاولات كثيرة لإثباتها تجريبيًّا، لكنها لم تُحقِّق سوى نجاح متفاوت. فهناك حقًّا ميل عام لارتباط بين سرعتَي الأيض: القصوى وعند الراحة، ولا يزيد الأمر عن هذا إلا قليلًا، وهناك استثناءات كثيرة لهذه القاعدة. لعل الاثنتين كانتا مرتبطتين في مسيرة التطور، حتى إذا لم يكن هذا الارتباط ضروريًّا من الناحية الفسيولوجية. ومن الصعب علينا الجزم بالأمر بصفة مؤكدة في ظل عدم وجود فكرة أكثر تحديدًا لدينا عن التاريخ التطوُّري. ولكن من قبيل المصادفة يمكن في هذه المرة أن يحمل سجل الحفريات الحل لهذه المشكلة. ربما لا نصل إلى الحلقة المفقودة عن طريق الفسيولوجيا، وإنما عن طريق التعاقبات التاريخية.

تُعنى فكرة الدم الحار أساسًا بالأعضاء الحشوية مثل الكبد. ولكن الأنسجة الرخوة لا تظل محفوظة فترات طويلة، وحتى الفراء نادرًا ما يُحفظ في الصخور. لذا لوقت طويل كان من الصعب أن نتوصَّل إلى أصول الدم الحار من سجل الحفريات، وحتى في وقتنا الحالي ليس من الغريب أن تحتدم خلافات شديدة بين العلماء. ولكن إعادة تقييم سجل الحفريات في ضوء القدرة الهوائية مهمة أكثر سهولة؛ إذ يمكن جمع معلومات عديدة من البنية الهيكلية.

يمكن تتبُّع أسلاف كلٍّ من الثدييات والطيور حتى العصر الترياسي الذي بدأ منذ ٢٥٠ مليون سنة. جاء هذا العصر في أعقاب أكبر حالة انقراض شاملة في تاريخ كوكبنا الأرضي بكامله؛ الانقراض البرمي، الذي يُعتقَد أنه استأصل حوالي ٩٥ بالمائة من جميع أنواع الحيوانات. وكان من بين الناجين القليلين من هذه المذبحة مجموعتان من الزواحف: الثيرابسيدات (زواحف شبيهة بالثدييات) وهي أسلاف الثدييات الحديثة، والأركوصورات (لفظة يونانية معناها «العظايا الحاكمة»)، وهي أسلاف الطيور والتمساحيات، فضلًا عن الديناصورات والزواحف المجنَّحة.

في ضوء ما حدث بعد ذلك من هيمنة للديناصورات، فلعلَّك تعجب إن عرفت أن الثيرابسيدات كانت أنجح مجموعة حيوانية في بدايات العصر الترياسي. واستجابة لهجمات الديناصورات، انكمشَتْ أجساد ذرياتها — التي هي الثدييات — في الحجم، ونزلَتْ في الجحور. ولكن قبل هذا في العصر الترياسي، كان أكثر الأنواع سيادة هو الليستروصورس (العظاءة المجرفة)؛ وهو حيوان عشبي في حجم الخنزير، له نابان قصيران، ووجه عريض وصدر برميلي الشكل. ليس من المعروف الطريقة التي كانت تعيش بها الليستروصورس. وقد كان العلماء على مدى سنوات كثيرة يتخيَّلونها في صورة وحوش برمائية، أو كأفراس نهر صغيرة زاحفة، ولكن من المعتقد اليوم أنها عاشت في أجواء أكثر جدبًا، وافتُرض أنها كانت تحفر جحورًا، وهي سمة شائعة بين الثيرابسيدات. وسوف نعود إلى أهمية ذلك فيما بعد، ولكن ما هو واضح أن الليستروصورات سادت في بدايات العصر الترياسي بطريقة لم تحدث مجددًا.[٦] ويُقال إنه، خلال فترة ما، كانت تلك الليستروصورات تُشكِّل ٩٥ بالمائة من جميع الفقاريات الأرضية. وهذا يُذكِّرنا بقول شاعر أمريكي، من المهتمين بالمذهب الطبيعي، ويُدعَى كريستوفر كوكينوس: «تخيَّلْ إذا استيقظت غدًا، وتجوَّلْتَ بين القارات فوجدت كلَّ الحيوانات سناجب.»

كانت الليستروصورات أنفسها من العواشب، ولعلها كانت العواشب الوحيدة في ذلك الزمن البعيد. ولم تكن تخشى أي مفترسات وقتئذ. ولكن بعد ذلك خلال العصر

الترياسي ظهرت مجموعة من الثيرابسيدات ذات صلة تُسمَّى السينودونتات (لفظ يوناني معناه «أسنان الكلب») وبدأت تحل محل الليستروصورات، التي انقرضت في نهاية الأمر في أواخر العصر الترياسي، منذ ٢٠٠ مليون سنة. وشملت السينودونتات حيوانات من العواشب ومن اللواحم أيضًا وكانت هي الأسلاف المباشرة للثدييات، ونشأت قبيل نهاية العصر الترياسي. أظهرت السينودونتات الكثير من علامات القدرة الهوائية العالية، بما فيها الحنك العظمي (الذي يفصل المسالك الهوائية عن الفم؛ ليتيح التنفُّس والمضغ في آنٍ واحد) وصدر عريض به قفص صدري مُعدَّل، ويُرجَّح أنه كان له حجاب حاجز عضلي. وليس هذا فحسب، بل كانت مسالكها الأنفية واسعة وتضم شبكية دقيقة من العظم تُعرَف بالمحارات التنفُّسية. بل ربما كانت السينودونتات مغطاة بالفراء، ولكنها كانت تضع البيض كالزواحف.

وهكذا، يبدو من المحتمل أن السينودونتات كانت لديها قدرة هوائية عالية، وهذه لا بد أنها أعطتها درجة تحمُّل كبيرة. ولكن ماذا عن سرعة الأيض لديها عند الراحة؟ وهل كانت من ذوات الدم الحار كذلك؟ يقول جون روبن إن المحارات التنفسية هي من الدلائل القليلة القوية على وجود سرعة أيض عالية عند الراحة. فهي تحد من فقدان الماء، والذي يمكن أن يكون أمرًا جوهريًّا أثناء التنفس الكثيف المستمر، بعكس ما يحدث أثناء الدفعات القصيرة من النشاط. ونظرًا لأن الزواحف لديها سرعة أيض منخفضة عند الراحة فإنها تتنفَّس بخفة شديدة حينما تكون مرتاحة ولا تحتاج إلى الحد من فقدان الماء إلا قليلًا. ونتيجة لهذا لم نعرف أن الزواحف لديها محارات تنفسية بل على العكس من هذا، فإن جميع الكائنات ذوات الدم الحار — تقريبًا — لديها محارات تنفسية، وإن كان ثمة استثناءات قليلة تتضمَّن الرئيسيات وبعض الطيور. من الواضح أن تلك التراكيب مفيدة، حتى إذا لم تكن ضرورية بصفة مطلقة، ويُعَدُّ وجودها في الحفريات دليلًا جيدًا، مثل أي دليل مادي آخر، على منشأ صفة الدم الحار. فإذا قَرَنَّا هذا مع الوجود المحتمل للفراء (الذي تَمَّ تخمينه ولم يُلاحَظ بالتأكيد في الحفريات) فإنه يبدو وكأن السينودونتات قد نشأت بها صفة الدم الحار في نقطة ما على خط التطوُّر؛ وانتقلت من ثم إلى الثدييات.

لكن بالرغم من كل هذا، فسرعان ما وجدت السينودونتات أنفسها في موقف ضعف، وانتهى الأمر بها إلى الانزواء في حياة ليلية مرتعدة إزاء الأركوصورات القاهرة في أواخر «فترة السيادة في العصر الترياسي». فإذا كانت السينودونتات قد نشأت عنها صفة الدم

الحار بالفعل، فماذا عن الحيوانات القاهرة لها؛ وهي مجموعة سرعان ما نشأت منها أوائل الديناصورات؟ إن آخر من نجا من فترة العصر الأركوصوري، وهما التماسيح والطيور، هما من ذوات الدم البارد والدم الحار على الترتيب. وعند نقطة ما في المسيرة المؤدية لظهور أوائل الطيور، نشأت صفة الدم الحار لدى الأركوصورات. ولكن أي تلك الكائنات، ولماذا؟ وهل شملت الديناصورات؟

هنا نَجِد الموقف أكثر تعقيدًا، بل مثيرًا للجدل بشدة في بعض الأوقات. فالطيور، مثل الديناصورات، تجتذب آراء انفعالية، وتلك تتنكَّر بالكاد في هيئة علمية. فبعد أن اعتُبِرَت الطيور فترة طويلة ذات علاقة ما بالديناصورات، وتحديدًا بمجموعة تُسمَّى الثيروبودات — التي تشمل الديناصور الشهير تيرانوصورس ركس (تي ركس اختصارًا) — أُعِيدَ تعيين موضعها ضمن خط الثيروبودات عن طريق سلسلة من الدراسات التشريحية المنهجية، المعتمدة على الشكل والمقارنة، التي تعود إلى منتصف الثمانينيات من القرن العشرين. وكان الاستنتاج الكبير هو أن الطيور ليست على علاقة قرابة بالديناصورات وحسب، بل إنها من الديناصورات بالفعل، وتحديدًا: الثيروبودات الطيرية. وفي حين أن معظم الخبراء مقتنع بهذه الفكرة، فإن هناك أقلية عالية الصوت يتزعمها عالم متخصص في علم الطيور القديمة وحفرياتها، ويُدعَى آلان فيدوتشيا، بجامعة نورث كارولينا، يؤكِّد أن الطيور تنحدر من مجموعة أكثر قدمًا انفصلت قبل نشوء الثيروبودات. وبناء على هذه الفكرة، لا تكون الطيور من الديناصورات، وإنما تشكِّل رتبة فريدة في أصولها.

أثناء كتابتي لهذه السطور، تركز آخر دراسة ظهرت في هذا الطابور الطويل من الدراسات على البروتينات وليس الصفات الشكلية. ويُظهر هذا الاكتشاف المذهل الذي تَمَّ في عام ٢٠٠٧، على يد فريق بكلية الطب بجامعة هارفرد الأمريكية تحت قيادة جون أسرا، أنَّ عظمةً من ديناصور تي ركس تَمَّ حفظها بصورة جيِّدة — وبدرجة استثنائية؛ إذ يرجع عمرها إلى ٦٨ مليون عام مَضَتْ — ما زالت تحتوي على فتات من الكولاجين وهو المكوِّن العضوي الرئيسي للعظم. وقد نجح هذا الفريق في تحديد تسلسل الأحماض الأمينية في قليل من هذا الفتات، ثم ضمها معًا للحصول على تسلسل لجزء من بروتين التي ركس. وفي عام ٢٠٠٨ قارنوا هذا بالتسلسلات المناظرة في الثدييات والطيور والتماسيح الأمريكية. كانت تسلسلات التي ركس التي حصلوا عليها قصيرة، ومن ثم يمكن أن تكون خادعة، ولكن في مقابل هذا، اكتشفوا أن أقرب قريب حي للتي ركس هي الدجاجة العادية (التي نعرفها ونأكلها) وتتبعها مباشرةً النعامة. ولا يثير

العجب أن نجد أن تلك التقارير كانت محل ترحيب عدد كبير من المصفقين والمؤيدين في الصحف؛ إذ سعدوا أخيرًا بمعرفة ما يمكن أن يكون طعم شريحة من التي ركس. لكن المهم في الأمر أن دراسة الكولاجين تُعزِّز بدرجة كبيرة الصورة التشريحية للطيور باعتبارها ديناصورات ثيروبودية.

المصدر الرئيسي الآخر للخلاف المرير في عالم الطيور هو الريش. فلطالما أكَّدَ فيدوتشيا وآخرون أن الريش نشأ خصوصًا لأجل الطيران في الطيور، وأنه يُضفي عليها نوعًا إعجازيًّا من الكمال. ولكن إذا كان الريش قد نشأ للطيران، فلا بد بالتأكيد ألَّا يُوجَد بين الثيروبودات غير الطيرية مثل التي ركس. يقول فيدوتشيا إن الأمر كذلك بالفعل. ولكن اكتُشِفَتْ في الصين على مدى العقد الأخير سلسلة من الديناصورات المريشة. صحيح أن بعضها مشكوك فيه، إلا أن غالبية الخبراء مقتنعون بأن الثيروبودات غير القادرة على الطيران كان لديها ريش بالفعل، بما فيها سلف صغير للتي ركس نفسه.

وتقول الفكرة البديلة إن «الريش» ليس في حقيقته كما يبدو عليه، بل هو في الواقع ألياف كولاجينية مهروسة، لكن هذا زعم غير مدعوم بالدليل. فإذا كانت مجرد ألياف كولاجينية، فمن الصعب تفسير السبب في وجودها بالضرورة، غالبًا ضمن مجموعة واحدة من الثيروبودات تُعرَف بالرابتورات وهي مجموعة تشمل الفيلوسيرابتور (الرابتور السريع) الذي اشتهر بظهوره في فيلم ستيفن سبيلبرج «الحديقة الجوراسية». أيضًا من الصعب تفسير السبب وراء أنها تبدو تمامًا مثل ريش الطيور مكتملة الريش ومحفوظة في نفس الطبقات الأرضية. ولا يقتصر الحال على أن يبدو الريش حقيقيًّا، بل إن بعض الرابتورات، لا سيما الميكرورابتور (الرابتور الصغير) أمكنها على ما يبدو أن تنسَلَّ بخفة بين الأشجار يساعدها الريش الذي كان ينبت بكثافة من جميع أطرافها الأربعة (أو من الأفضل أن نقول: من جناحيها وساقيها). من الصعب عليَّ أن أُصدِّق أن هذا الريش الذي تَمَّ حفظه جيدًا ليس ريشًا، وحتى فيدوتشيا سيسلِّم بهذا. وتُعَدُّ النقطة المتعلقة بما إذا كان طيران الميكرورابتور المنزلق بين الأشجار له علاقة بأصول الطيران في الطيور الحقيقية، أو بأقرب أقربائها المسمى الطائر البدائي أو الأركيوبتركس، موضع بحث ونقاش.

واستنتاج أن الريش قد نشأ عند الديناصورات الثيروبودية، قبل نشوء خاصية الطيران في عالم الحيوان، تدعمه دراسات عن التطور الجنيني للريش عند الطيور، ولا سيما علاقته بجلد التماسيح في مراحله الجنينية. تذكر أن التماسيح أركوصورات حية؛

أي إنها العظايا الحاكمة التي ظهرت لأول مرة في العصر الترياسي. وقد بدأت التماسيح والديناصورات (متضمنة الطيور) في التشعُّب والتباعد في منتصف العصر الترياسي، منذ حوالي ٢٣٠ مليون سنة. ومع هذا التفرُّق القديم، فما زالت التماسيح تحمل في داخلها بالفعل «بذور» الريش وأصوله. وحتى اليوم ما زالت تحتفظ بالطبقات الجلدية الجنينية نفسها التي تتطوَّر إلى ريش في الطيور، فضلًا عن نفس البروتينات عينها المسماة كيراتينات الريش، التي تكون خفيفة ومرنة وقوية بطبيعتها.

تُوجَد كيراتينات الريش في أغلبها في بعض طبقات جلد التمساح الجنينية التي تنسلخ بعد فقس البيض لتكون حراشيفه هي الظاهرة. (وتُوجَد بقايا منها في حراشيف التمساح البالغ كذلك.) ولدى الطيور حراشيف مشابهة على سيقانها وأقدامها، وهي تنكشف أيضًا حينما تنسلخ الطبقات الجلدية الخارجية بعد فقس البيض وخروج الأفراخ. ويقول لورنزو أليباردي، إخصائي التطور الارتقائي للريش بجامعة بولونيا بإيطاليا، إن الريش ينمو من ذات الطبقات الجنينية التي تنسلخ حينما تتكوَّن الحراشيف. وتستطيل الحراشيف الجنينية لتكوِّن شعيرات أنبوبية رفيعة. وهذه تراكيب مجوفة شبيهة بالشعر، ولها جدر حية، تتكوَّن من الطبقات الجلدية الجنينية، التي يمكن أن تنبت فروعًا من أي موضع على طولها.[٧] وأبسط أنواع الريش — الريش الزغبي — هو بالأساس خصلات من الشعيرات الريشية المتصلة معًا عند نفس النقطة، بينما يتكوَّن ريش الطيران من شعيرات متوازية ترتبط طوليًّا بساق مركزية تُسمَّى «السهم». وتعمل الجدر الحية للشعيرات على تكوين مادة الكيراتين قبل أن تتحلَّل مُخلِّفة وراءها تركيبًا متفرعًا مكونًا من الكيراتين؛ الذي نسميه «الريشة». ولا يقتصر الحال بالريش النامي على تكوُّنه من طبقات جلدية وبروتينات موجودة بالفعل. بل حتى الجينات المطلوبة لتكوين الريش تكون جاهزة أصلًا، بل إنها تُوجَد في التماسيح، ومن ثم يُفترض أنها كانت موجودة في أسلافها الأركوصورية المشتركة لكلٍّ من الطيور والتماسيح. ولم يتغيَّر فيها سوى البرامج التطورية فقط. وتلك العلاقة الجنينية الوثيقة بين الريش والحراشيف تدل عليها الطفرة الفريدة (للغاية) التي تجعل حراشيف الطيور تتحوَّل إلى ريش ينبت من سيقانها. ولكن لم يحدث أن رأى أحدٌ تمساحًا ذا ريش حتى الآن.

من هذا المنظور، ينبثق الريش الأوَّلي حتى من جلد أقدم الأركوصورات، إذن فليس بالغريب أن بدأ يتكوَّن لدى الثيروبودات زوائد من بشرة جلودها، ويُرجَّح أنها كانت تتراوح بين ما يشبه الشعر السميك الصلب (مثل الذي لدى التيروصورات) وحتى

التراكيب المتفرعة البسيطة، التي تضاهي الريش الزغبي. ولكن في أي شيء كانت تُستخدَم، إن لم يكن في الطيران؟ هناك الكثير من الإجابات المعقولة ولكنها ليست دامغة بالكامل، بما فيها لفت الأنظار بهدف التزاوج، أو أداء وظائف حسية، أو الحماية (إذ تعمل الشعيرات الريشية على تضخيم حجم الحيوان، بالإضافة إلى وخز الأعداء كما في القنفذ والشيهم)، وكذلك كعامل عزل بطبيعة الحال. وإن ما كان يحدث من مشاغبات بين الثيروبودات المريشة يزيد احتمال أنها كانت من ذوات الدم الحار، مثل أقربائها الأحياء: الطيور.

ثمة دليل آخر يتسق مع الفكرة التي تعتبر الثيروبودات مجموعة نشطة من الديناصورات، بما يفترض على الأقل أنها كانت تمتلك قدرة على التحمل. وهذا المظهر يتعلَّق بالقلب؛ فالتمساحيات والطيور تختلف عن العظايا ومعظم الزواحف الأخرى في أنها جميعًا لديها قلوب قوية ذات أربع غرف. ومن ثم، يفترض أن القلب رباعي الغرف كان صفة توارثتها جميع الأركوصورات، ومن ثم الديناصورات. ويُعتبَر القلب رباعي الغرف مهمًّا لأنه يقسم الجهاز الدوري إلى قسمين؛ فنصفه يغذي الرئتين، والآخر لباقي الجسم. وهذا يعطي ميزتين مهمتين؛ أولاهما أن الدم يمكن أن يضخ بضغط عالٍ إلى العضلات والمخ ... إلخ، دون إتلاف لأنسجة الرئتين الرقيقة (الذي إن حدث فسيؤدِّي إلى استسقاء رئوي واحتمال الوفاة). ومن الواضح أن الضغط الدموي الأكثر ارتفاعًا يمكن أن يعزز المزيد من النشاط فضلًا عن الوصول إلى حجم أضخم بكثير. ولم يكن للديناصورات الضخمة أن تُضَخَّ دماؤها حتى تصل إلى مخاخها دون وجود قلب رباعي الغرف. وثانيهما: إن تقسيم الجهاز الدوري إلى قسمين يعني عدم اختلاط الدم المؤكسج بغير المؤكسج؛ إذ يعود الدم المؤكسج من الرئتين ويتم ضخه فورًا بضغط عالٍ إلى بقية الجسم، موصلًا أقصى قَدْر من الأكسجين إلى الأماكن التي تحتاجه. صحيح أن وجود قلب رباعي الغرف لا يفترض بالضرورة أن يكون الحيوان من ذوات الدم الحار (فالتماسيح من ذوات الدم البارد على أي حال)، إلا أنه يكاد يُعَدُّ ضربًا من المستحيل أن يحصل الحيوان على قدرة هوائية عالية دون أن يكون لديه قلب بهذه الصفة.

ويبدو أيضًا أن الجهاز التنفسي للديناصورات الثيروبودية كان مشابهًا لذلك الخاص بالطيور ويُحتمَل أنه كان يُعزِّز الحصول على درجات عالية من النشاط. تعمل رئتا الطائر بشكل مختلف عن رئتي الإنسان، وهما أكثر كفاءة حتى في المناطق المنخفضة، وفي

المناطق المرتفعة يكون الفارق مذهلًا. فالطيور يمكنها أن تستخرج قَدْرًا من الأكسجين يزيد بمقدار ضعفَيْ أو ثلاثة أضعاف ما تستخرجه الثدييات من الهواء المخلخل. ولهذا يستطيع الإوز المهاجر أن يطير لارتفاع آلاف الأقدام، فوق قمة إفرست، بينما تلهث الثدييات لكي تتنفس عند ارتفاعات أقل بكثير.

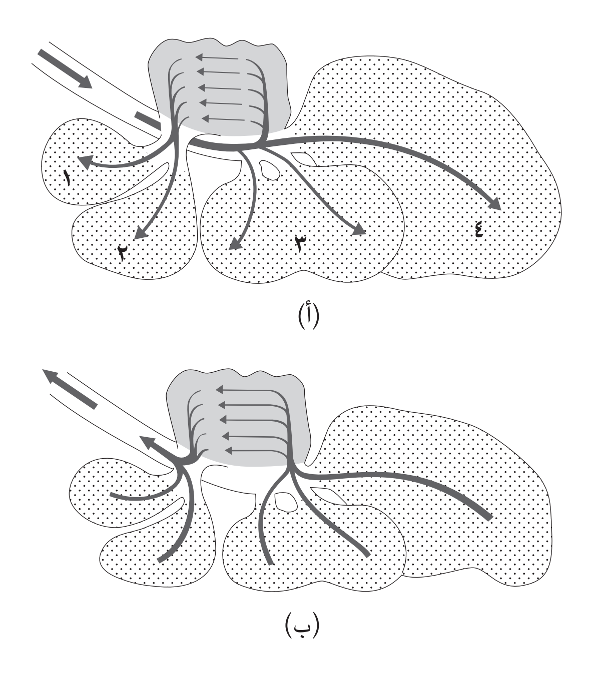
إنَّ رئتَيِ الإنسان أشبه بشجرة جوفاء، يدخل فيها الهواء عن طريق الجذع الأجوف (القصبة الهوائية) ثم يتَّجِه إلى إحدى شعبتين (تُسمَّيان الشعبتين الهوائيتين) وكلٌّ منهما تنقسم بدورها إلى شُعَبٍ صغيرة (شُعَيْبات هوائية) تستدق أكثر كلما تفرَّعَتْ، ولكنها لا تنتهي بنهايات حادة، وإنما ببالونات نصف منفوخة تُسمَّى الحويصلات الهوائية، التي تمتلئ جدرها الرقيقة بشعيرات دموية دقيقة، والتي تحدث عندها عملية تبادل الغازات. في هذه الحويصلات يعطي هيموجلوبين خلايا الدم الحمراء ما فيه من غاز ثاني أكسيد الكربون ويلتقط غاز الأكسجين قبل أن يُسحَب ليعود أدراجه إلى القلب. ويتم نفخ المجموعة البالونية بكاملها بالهواء ثم تفريغها — مثل المنفاخ — عن طريق التنفُّس، الذي تحث عليه عضلات في القفص الصدري والحجاب الحاجز. وتكمن نقطة الضعف التي لا مفر منها في أن الشجرة التنفسية ككلٍّ تنتهي بفراغات مقفلة؛ حيث يحدث امتزاج للهواء بالكاد، ويحدث هذا في نفس الحيِّز الذي تكون فيه الحاجة إلى الهواء النقي أشد ما يمكن. وحتى حينما يصل الهواء النقي، يكون قد امتزج بالفعل بالهواء الراكد وهو في طريقه للخروج في صورة هواء زفير.

أما الطيور، فلديها خلافًا لهذا رئات زاحفية معدلة. الرئة الزاحفية القياسية لها تركيب بسيط، فهي مجرد كيس كبير، في واقع الأمر، ينقسم بأغشية نسيجية، تُسمَّى حواجز، تقسم التجويف المركزي إلى غرف. والرئة الزاحفية، مثلها في ذلك مثل الرئة الثديية، تعمل وظيفيًّا مثل المنفاخ، إما عن طريق توسيع القفص الصدري، أو في حالة التمساح، عن طريق حجاب حاجز يشبه المكبس في وظيفته، ملتصق بالكبد ويُسحَب للوراء بفعل عضلات مثبتة بعظم العانة. وهذا يجعل رئة التمساح شبيهة إلى حد ما بالمحقن؛ حيث يُعتبَر الحجاب الحاجز مقابلًا للكباس الداخلي الحاجز للهواء، الذي يُسحَب للوراء لتمتلئ الرئة بالهواء. ومع أنها طريقة قوية للتنفس، فإن لدى الطيور طريقة أكثر تقدُّمًا؛ إذ تحوِّل نصف أجسامها إلى جهاز معقد ذي اتجاه واحد من الأكياس الهوائية. فبدلًا من أن يدخل الهواء إلى الرئتين مباشرةً فإنه يتدفق أولًا إلى جهاز الأكياس الهوائية، ثم يخرج في نهاية الأمر عن طريق الرئتين، محققًا تدفقًا

مستمرًّا للهواء من البداية للنهاية، وهذا يتفادى مشكلة الفراغ الراكد في الحويصلات الهوائية البشرية المسدودة عند نهايتها. وهكذا يتدفَّق الهواء عَبْرَ الحواجز (فيتم تنقيته في الطيور) أثناء كلٍّ من الشهيق والزفير، عن طريق حركة الضلوع السفلية وجهاز الأكياس الهوائية الخلفية، وأهم ما في الأمر أن الطيور ليس لديها حجاب حاجز. فضلًا عن هذا، فإن الهواء يتدفق في اتجاه واحد، بينما يتدفق الدم في الاتجاه العكسي؛ مما يُحقِّق عملية تبادل للغازات بالتيار المضاد، الأمر الذي يُعزِّز انتقال الغازات لأقصى حدٍّ (انظر الشكل ٨-١).[٨]

والسؤال الذي أثار خلافًا وشقاقًا على مدى عقود هو: ما نوع الرئات التي كانت لدى الثيروبودات؟ أهي رئات مكبسية مثل رئات التماسيح، أم أنها رئات بالتدفق المستمر كالتي في الطيور؟ جدير بالذكر أن جهاز الأكياس الهوائية في الطيور يغزو الأنسجة الرخوة في الصدر والبطن، بل إنه يدخل في مادة العظام، بما فيها الضلوع والعمود الفقري. ولطالما عرف الخبراء أن الثيروبودات لديها تجاويف في عظامها بنفس الأماكن التي لدى الطيور. وقد استخدم عالم الحفريات روبرت باكر هذا الاكتشاف مع آخرين؛ لكي يُعِيدَ تقييم الديناصورات باعتبارها حيوانات من ذوات الدم الحار في منتصف السبعينيات من القرن العشرين، وهي وجهة نظر ثورية ألهمت مايكل كرايتون بتأليف روايته «الحديقة الجوراسية» التي تحوَّلَتْ لاحقًا إلى فيلم بالاسم نفسه. إلا أن جون روبن وزملاءه أعادوا دراسة رئات الثيروبودات بشكل مختلف؛ باعتبارها أقرب إلى رئات التماسيح بما فيها من حجاب حاجز مكبسي، وهو أمرٌ أمكَنَ الكشف عنه بشكل غير حاسم في حفرية أو اثنتين. لا ينكر روبن وجود الجيوب الهوائية في عظام الثيروبودات، ولكن الخلاف هو بشأن الغرض منها؛ إذ يقول إنها ليست موجودة بهدف التنفس وإنما لأسباب أخرى هي تخفيف الوزن أو تعزيز التوازن في حيوانات تسير على قدمين. وقد احتدم الجدل، دون حلٍّ حقيقي، مع عدم وجود معلومات جديدة مؤكدة، إلى أن نُشِرَ بحثٌ مهمٌّ في مجلة «نيتشر» في عام ٢٠٠٥ من جانب كلٍّ من باتريك أوكونر وليون كلايسنس، وكانا في تلك الآونة بجامعتي أوهايو وهارفرد على الترتيب.

وقد بدأ أوكونر وكلايسنس بإجراء فحص دقيق لأجهزة الأكياس الهوائية لدى مئات عدة من الطيور الحية (أو بالأحرى، على حدِّ قولهما، فإنهما فحصَا عينات تم إنقاذها أُخِذَتْ من مراكز إعادة تأهيل الحيوانات البرية ومن المتاحف.) وقامَا بحقن الأكياس الهوائية في تلك الطيور باللاتكس؛ ليتمكَّنا من تبيُّن الصفة التشريحية للرئتين



شكل ٨-١: تدفق الهواء خلال رئات الطيور أثناء (أ) الشهيق و(ب) الزفير. (١) الكيس الهوائي الترقوي. (٢) الكيس الهوائي الصدري الجمجمي. (٣) الكيس الهوائي الصدري الذيلي. (٤) الكيس الهوائي البطني. ويتدفَّق الهواء باستمرار في نفس الاتجاه خلال الرئتين، بينما يتدفَّق الدم في الاتجاه الآخر؛ مما يحدث عملية تبادل للغازات عالية الكفاءة بأسلوب التيار المضاد.

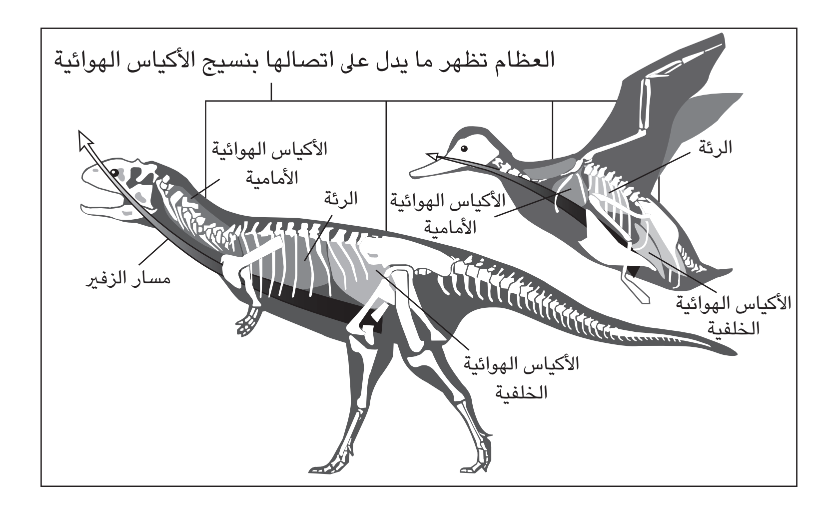
بشكل أفضل. وكان أول ما أدركاه أن هذا الجهاز أكثر تغلغلًا في جسم الطائر مما كانَا يظنان في السابق؛ إذ لا يحتل أجزاء من الرقبة والصدر فحسب بل الجزء الكبير من التجويف البطني أيضًا. ومن ثم يغزو أسفل العمود الفقري؛ وهو من التفاصيل المهمة لتأويل التركيبة التشريحية الهيكلية للثيروبودات. فهذا الكيس الهوائي الخلفي (الذيلي) هو القوة الدافعة الحقيقية من وراء الجهاز الرئوي للطيور بكامله؛ فأثناء التنفس يصير منضغطًا دافعًا الهواء إلى الرئتين من الخلف. وحينما يتمدد الكيس الهوائي الذيلي مجددًا يسحب الهواء من الأكياس الهوائية المرتبطة بها في الصدر والرقبة، وبلفظ آخر نقول

إنها مضخة ماصة. وهي تعمل بشكل ما مثل مزامير القرب؛ حيث يُسبِّب ضخ الهواء من القربة تدفقًا مستمرًّا للهواء خلال البوق الخارجي.

وقد تابع أوكونر وكلايسنس عملهما بتطبيق نتائجهما على البنية العظمية لحفريات الثيروبودات، ومنها هيكل عظمي رائع لأحد الثيروبودات بعيدة الصلة بالطيور، ويُسمَّى ماجونجاثولس أتوبس. وفي حين ركزت معظم الدراسات على التركيبة العظمية للفقرات العليا والضلوع، بحث العالمان عن تجاويف في أسفل العمود الفقري بوصفها دليلًا على وجود أكياس هوائية بطنية في الثيروبودات، وقد وجداها بالفعل في نفس مكان وجودها في الطيور. ليس هذا فحسب، بل إن التركيب التشريحي للعمود الفقري والقفص الصدري وعظم القص يفي بمواصفات المضخة الماصة؛ إذ تتيح المرونة الكبيرة للضلوع السفلية وعظم القص ضغط وتفريغ الكيس الهوائي الذيلي الذي يستطيع تهوية الرئتين من الخلف كما في الطيور. وبصفة عامة، نقول إنه لا يُوجَد شك — إلا قليلًا — في أن الديناصورات الثيروبودية كانت لديها بالفعل مضخة تنفسية ماصة كالتي في الطيور، وهو ما يُعَدُّ أكثر أجهزة التنفس كفاءة بين جميع الفقاريات (انظر الشكل ٨-٢).

وهكذا فإن لدى الثيروبودات رِيشًا وقلوبًا رباعية الغرف وأكياسًا هوائية مزدوجة ومتصلة بالرئات، محققة تدفقًا مستمرًّا للهواء فيها باتجاه واحد، وكل ذلك يوحي بأن تلك الحيوانات عاشت حياة نشطة تطلَّبَتْ قدرةً على التحمُّل. ولكن هل أدَّتْ قُدْرَتُها على التحمُّل بشكلٍ حتميٍّ إلى اكتساب خاصية الدم الحار الحقيقية، حسبما تقول فرضية القدرة الهوائية، أم أنها كانت في موقع متوسط بين التماسيح الحديثة والطيور؟ صحيح أن ريش تلك الحيوانات يوحي بأنه عملَ كطبقة عازلة؛ ومن ثم اعتُبِرَتْ من ذوات الدم الحار، ولكن يُحتمَل أن الريش كان لأغراض أخرى؛ كما أن الأدلة الإضافية المطلوبة تتسم بالغموض، بما فيها المحارات التنفسية.[٩]

تشترك الطيور مع الثدييات في أن لدى معظمها ما تُسمَّى المحارات التنفسية، إلا أنها لا تتكوَّن من العظم كما في الثدييات، ولكن من الغضاريف، التي تقل قابليتها للحفظ ضمن الحفريات. ومن ثم، ليس هناك إلى الآن ما يدل على وجود تلك التراكيب لدى الثيروبودات بالرغم من وجودِ قليلٍ من الحفريات حُفِظَتْ بحالة جيدة ويمكن فحصها. لكنَّ ثمة دليلًا مهمًّا كما يذكر جون روبن يتمثَّل في أن المحارات التنفسية في الطيور دائمًا ما تكون مصحوبة بتضخم طبيعي في المسالك التنفسية. فمن المفترض أن المحارات التنفسية بشكلها اللولبي تَعُوق تدفق الهواء إلى حدٍّ ما، الأمر الذي يمكن



شكل ٨-٢: تمثيل لجهاز الأكياس الهوائية في ديناصور من نوع ماجونجاثولس أتوبس مقارنةً بما في الطيور الحديثة. في كلتا الحالتين، يتم دعم الرئة بأكياس هوائية أمامية وخلفية، وآثار هذه الأكياس في عظام الديناصور تناظر تمامًا ما يقابلها في الطيور. وتعمل الأكياس الهوائية مثل المنفاخ لتحريك الهواء عَبْرَ الرئة المتماسكة.

تعويضه أو مقابلته بتضخيم المسالك التنفسية. إلا أن الثيروبودات لا تتسم بمسالك أنفية متضخمة بشكل خاص. وهذا يوحي بأن الغياب الظاهري للمحارات التنفسية لديها هو أمر حقيقي، وليس راجعًا إلى مجرد عدم حفظ تلك التراكيب الأنفية ضمن الحفريات. فإذا لم يكن لدى تلك الحيوانات محارات تنفسية، فهل يُحتمَل مع ذلك أنها كانت من ذوات الدم الحار؟ حسنًا؛ إننا معشر البشر ليست لدينا محارات تنفسية كالتي لدى غيرنا من الثدييات، ولكننا من ذوي الدم الحار. ومن ثم تكون الإجابة عن السؤال بـ «نعم». ولكن هذا يثير بدوره بعض التساؤلات.

يعتقد روبن نفسه أن الثيروبودات كانت لديها قدرة هوائية عالية، ولكنها لم تكن من ذوات الدم الحار، مع أن فرضيته عن القدرة الهوائية تفيد بأن الأمرين يجب أن يترابطا. ومع أننا حتى الآن لا نعرف ما يكفي لكي نُؤكِّد هذا القول، فإننا نقول إن هناك إجماعًا، حتى وقتنا هذا، على أن الثيروبودات على الأرجح كان لديها أيض مرتفع

عند الراحة، ولكنها لم تكن بَعْدُ من ذوات الدم الحار. هذه على الأقل القصة التي تخبرنا بها الحفريات، ولكن هناك في الصخور ما هو أكثر من الحفريات؛ ومن ذلك سجل عن المناخ والأجواء في العصور القديمة. وثمة شيء ما بخصوص الهواء في العصر الترياسي من شأنه أن يضع سجل الحفريات في موضعه الصحيح. ولا تقتصر فائدته على تفسير القدرة الهوائية العالية للسينودونتات والثيروبودات، ولكن أيضًا تفسير السبب في وصول الديناصورات إلى وضع السيادة في ذلك العصر القديم.

إن معظم ما يتم من مناقشات في علم الفسيولوجيا يكون في قالب خالٍ من الأبعاد التاريخية؛ لوجود افتراض عقلي بأن الماضي مثل الحاضر، وأن ضغوط الانتقاء مثل الجاذبية الأرضية لا تتغيَّر بمرور الزمن. ولكن هذا غير صحيح، بدليل ما وقع من أحداث الانقراض الكبرى. وكان أكبرها ما حدث في نهاية العصر البرمي، منذ حوالي ٢٥٠ مليون سنة، ومثَّلَتْ علامة مباشرة على رفع الستار إيذانًا بظهور العظايا المهيمنة وتزايدها وتسيدها وبزوغ عصر الديناصورات.

غالبًا ما يُعتبَر حَدَثُ الانقراض البرمي أحد الألغاز الكبرى في الحياة — وهو ما يساعد على جذب أموال المنح الدراسية الهادفة لدراسته — إلا أن الخلفية البيئية التي جرى فيها لم تُرسَم إلا بخطوط عريضة. في واقع الأمر، لم تكن هناك واقعة انقراض شامل واحدة، بل اثنتان، تفصل بينهما حوالي ١٠ ملايين سنة، وكانت فترة من التدهور الشديد. وكلتا واقعتَي الانقراض كانت متوافقة زمنيًّا مع حدوث حالةِ تقلُّب بركانيٍّ طويلة الأمد، كانت أوسع حالات تدفق الحمم البركانية انتشارًا في تاريخ الأرض؛ دُفِنَتْ خلالها مساحات شاسعة — كادت تكون قارية بالكامل — تحت طبقات كثيفة من البازلت. وسبَّبَت الحمم المتدفقة تآكلًا أرضيًّا صنع تضاريس مدرجة تُعرَف باسم «الفخاخ». وقد شكَّلَتْ أولى تلك النوبات البركانية فخاخ إيميشان في الصين منذ حوالي ٢٦٠ مليون سنة، تَبِعَها بعد ٨ ملايين سنة أخرى تدفُّق أكبر في إقليم سيبيريا الروسي صنع الفخاخ السيبيرية. ومن المهم أن نعرف أن كلا التدفقين البركانيين الإيميشاني والسيبيري انبثق من خلال طبقات أرضية تحتوي على صخور كربونية وفحم. وهذا أمر مهم؛ لأن الحمم شديدة السخونة تتفاعل مع الكربون لإطلاق كميات هائلة من غازَيْ ثاني أكسيد الكربون والميثان، وذلك في كل ثوران بركاني على مدى آلاف السنين.[١٠] وهذا أدى إلى تغيير المناخ.

جَرَتْ محاولات كثيرة لتحديد العامل المتسبِّب في واقعتَيِ انقراض العصر البرمي. ومن ضمن العوامل المشتبه بها: الاحترار الكوكبي، واستنزاف طبقة الأوزون، وانبعاث غاز الميثان، والاختناق بثاني أكسيد الكربون، وتناقص الأكسجين، والتسمم بكبريتيد الهيدروجين … إلخ. وكانت الحالة الوحيدة التي تكاد تُستبعَد أن تكون مُسبِّبًا لهذه الأضرار هي سقوط أحد النيازك الضخمة واصطدامه بالأرض؛ إذ لا يُوجَد سوى القليل من الأدلة على حدوث اصطدام مثل ما حدث بعد ذلك بحوالي ٢٠٠ مليون سنة وأدَّى إلى إسدال الستار على عصر طويل من هيمنة الديناصورات على الأرض. أما باقي قائمة المسببات فتُعتبَر مقبولة بدرجة كبيرة، وقد حدث تقدُّمٌ كبير في الأعوام القليلة الأخيرة تمثَّلَ في معرفة أن كل تلك المسببات يجمعها رابط وثيق لا يمكن فصمه. فأي نوبة بركانية على مستوى ما حدث في الفخاخ الإيميشانية تسبب سلسلة من الظروف التي تظهر بزخم قويٍّ وبشكل متزايد وشديد الضرر. وتحدث في الوقت الحاضر سلاسل مشابهة مترابطة تُهدِّد عالمنا، إلا أنها حتى الآن لم تَصِل إلى حدٍّ يمكن مقارنته بما حدث في السابق منذ ملايين السنين.

لقد أطلقَتِ البراكينُ غازَيِ الميثان وثاني أكسيد الكربون عاليًا نحو طبقة الاستراتوسفير الجوية مع غازات ضارة أخرى، وكلها دمرت طبقة الأوزون وأدَّتْ بالتبعية إلى احترار العالم وجفافه. وانتشرت الأراضي المجدبة عَبْرَ قارة «بانجايا» القديمة الشاسعة. وجفَّتْ مستنقعات الفحم الكبرى التي كانت موجودة في العصرين السابقين: الكربوني، والبرمي. وتصاعد منها الكربون الذي استهلك الأكسجين؛ مما أدَّى إلى الإضرار الشديد بحيوية الهواء. وعلى مدى أكثر من ١٠ ملايين عام تدهورت مستويات الأكسجين كثيرًا، وببطء شديد من مستوى ٣٠ بالمائة إلى نقطة دنيا تقل عن ١٥ بالمائة. وأدَّى تجمُّع عوامل سخونة المياه (مما يقلل من قابلية الأكسجين للذوبان فيها) ونقص الأكسجين الجوي وزيادة ثاني أكسيد الكربون إلى خنق مظاهر الحياة في البحار. ولم يزدهر منها سوى البكتيريا، وكانت من نوعٍ سامٍّ سادَ كوكبنا زمنًا ما في العصر السابق على ظهور النباتات والحيوانات؛ مطلقًا غاز كبريتيد الهيدروجين السام بكميات هائلة في المحيطات والبحار، فتحوَّلَت البحار إلى اللون الأسود وغابَتْ عنها الحياة. وأدَّى انطلاق الغازات السامة من المحيطات المميتة إلى إفساد الهواء أكثر فأكثر؛ ممَّا أدَّى إلى خنق الحيوانات على الشواطئ. ثم جاء حينئذٍ — وحينئذٍ بالتحديد — آخر ضربات القَدَر؛ وهو ثوران الفخاخ السيبيرية البركانية الكبرى، وهو نذير للموت، ظلَّ يضرب ضربته على دفعات

متكررة على مدى يربو على ٥ ملايين عام. وعلى مدى تلك الفترة الزمنية لم يكن أي شيء حي يتحرَّك، إلا القليل على الأرض أو في البحار، ثم ظهر بعدها أول بصيص نور لتعافي الحياة.

السؤال الآن: من هم الناجون؟ الجواب ينطبق على سكان البحر مثلما ينطبق على سكان البر؛ فالناجون هم مَن استطاعوا التنفس بدرجة أفضل، والذين استطاعوا تحمُّل نقص الأكسجين وزيادة ثاني أكسيد الكربون ووجود مزيج مؤذٍ من الغازات الضارة، والذين تميَّزوا بإمكانات جعلتهم يلهثون طلبًا للهواء ومع ذلك بقوا نشطين، والذين عاشوا في الجحور والشقوق، وفي الوحل والمستنقعات ورواسب الأنهار، والذين دبروا معيشتهم في أماكن لم يستطع أن يقطنها كائن غيرهم. لقد نجا ألف ألف نوع من هذا المناخ القذر الموحل، ولولا هذا لما جئنا نحن البشر. ولهذا من المهم أن نعرف أن أول الحيوانات البرية التي تعافَتْ بعد تلك «المذبحة» الكبيرة كانت الليستروصورات، تلك الفقاريات الحفارة للجحور التي تتميَّز بصدور برميلية الشكل، وحجاب حاجز عضلي، وحنك عظمي، ومسالك تنفسية واسعة، ومحارات أنفية تنفسية. ولقد برزت من جحورها الزنخة وهي تلهث، واستعمرت الأماكن الخالية من السكان في قارات العالم، مثل السناجب.

هذه القصة المذهلة، المحفورة في قلب التركيب الكيميائي للصخور، استمرت لملايين السنين، وكانت طابعًا مميزًا للعصر الترياسي. اختفت الغازات السامة، ولكن ثاني أكسيد الكربون ارتفع كثيرًا؛ لما يزيد عن مستوياته اليوم بعشرة أضعاف. وبقي الأكسجين بإصرار عند مستواه المنخفض — الأقل من ١٥ بالمائة — وبقي المناخ مجدبًا على طول الأمد. وحتى في الأراضي الواقعة بمستوى البحر بَقِيَتِ الحيوانات تلهث طلبًا للأكسجين؛ إذ كانت مستويات الأكسجين هنالك وقتئذٍ كمستوياتها اليوم في أعالي الجبال. كان ذلك هو العالم الذي عاشت فيه أوائل الديناصورات، التي تغيَّرَتْ أوضاع أجسامها حتى صارت تسير على سيقانها الخلفية؛ فتحررت رئاتها من الضغوط التي كانت تعانيها العظايا الزاحفة على بطونها، التي كانت تَجِد صعوبة في المشي والتنفُّس في الآن عينه. أضِفْ إلى هذا وجود أكياس هوائية ومضخة ماصة تنفسية، وستجد أنَّ ظهور الديناصورات بدا أمرًا حتميًّا. هذه القصة رُوِيَتْ بتفاصيل مُقْنِعة في كتاب مهم بعنوان «عاشوا في هواء شحيح» ألَّفَه عالم الحفريات بجامعة واشنطن بيتر وارد. ويقول وارد (وإنني أصدق ما يقول) إن الأركوصورات حلَّتْ محل السينودونتات؛ لأن ما لدى الأولى من رئات بها

حواجز فاصلة حملت في داخلها سر النجاح، وهي القدرة الكامنة الغامضة على التحوُّل إلى الرئات الرائعة ذات التدفُّق المستمر للهواء باتجاه واحد؛ التي تتميَّز بها الطيور. وكانت الثيروبودات هي الحيوانات الحية الوحيدة التي لم تحتج للهاث طوال الوقت، ولم تكن لها حاجة ماسة للمحارات التنفسية.

ومن ثم، لم تكن القدرة على التحمُّل شيئًا زائدًا لا لزوم له، بل كانت منقذة للحياة أو بمنزلة تذكرة يانصيب رابحة للنجاة في أوقات الكوارث. ولكن تُوجَد هنا نقطة أختلف عندها مع وارد على مضض؛ فأنا أتفق معه في أن القدرة الهوائية العالية لا بد أنها كانت مهمة للنجاة والبقاء، ولكن هل أدت حقًّا إلى ارتفاع في سرعة الأيض عند الراحة أيضًا؟ إن وارد يفترض هذا (بذكره لفرضية القدرة الهوائية)، ولكن ليس هذا ما يحدث اليوم؛ حيث تعيش الحيوانات في الأماكن العالية. بل على العكس؛ إذ تميل الكتلة العضلية لديها للضمور، وتتفوَّق الأجسام النحيلة. ربما تكون القدرة الهوائية عالية، ولكن لا ترتفع سرعة الأيض عند الراحة بشكل يتسق معها، بل ربما تنخفض. إن فسيولوجية الجسم بصفة عامة تكون شحيحة في الأوقات الصعبة، وليست مسرفة على الإطلاق.

وبالعودة إلى العصر الترياسي، حين كانت النجاة أمرًا عزيزًا، هل رفعت الحيوانات حقًّا سرعة الأيض عند الراحة لديها بغير ضرورة؟ إن هذا يبدو منافيًا للبديهة على أقل تقدير. ويبدو أن الثيروبودات قد ارتفعت لديها القدرة الهوائية دون الحاجة لأن تصير من ذوات الدم الحار بالكامل؛ في بادئ الأمر على الأقل. إلا أن السينودونتات المنقرضة صارت — على ما يظهر — من ذوات الدم الحار. فهل حَدَثَ لها هذا بهدف التنافس — مع قلة الأمل في النجاح — مع الأركوصورات المخيفة؟ أم هل ساعَدَها هذا على البقاء في حالة نشاط بالرغم من انكماشها في الحجم وتكيُّفها للمعيشة الليلية؟ كلا الأمرين يُعَدَّان احتمالين معقولين تمامًا، ولكن هناك إجابة أخرى أُفضِّلها شخصيًّا؛ وهي إجابة قد تُلقي بعض الضوء لمعرفة السبب في أن الديناصورات حَدَثَ لها العكس تمامًا؛ إذ ازدهرت وصارت عملاقة بشكل لم يعرف له العالم مثيلًا بعدها.

من واقع خبرتي أَجِدُ أنَّ الأشخاص النباتيين لديهم مَيْل للنُّبل والطهارة أكثر مني، أو ربما كان هذا مجرد إحساس لديَّ بالذنب لأنني آكل اللحوم. ولكن وفق دراسة مهمة نُشِرَتْ في مجلة مغمورة نوعًا ما تُسمَّى «إيكولوجي ليترز» في عام ٢٠٠٨، فإن النباتيين لديهم الكثير ليتفاخروا به أكثر مما أضفت عليهم من فضل وشرف. فلولا النباتيون، أو

على الأحرى أسلافهم من الكائنات نباتية التغذية، ربما لما كنا اكتسبنا خاصية الدم الحار وما يصاحبها من وتيرة سريعة للحياة. وقد أجرى هذا البحث مارسيل كلاسين وبارت نوليت من المعهد الهولندي لعلم البيئة، وهو يُقيِّم على نحوٍ كمِّيٍّ («حسابي قياسي» من الناحية الفنية) الفارق بين اللحوم والنباتات.

إنك إن ذكرت كلمة «بروتين» فستجد معظم الناس يفكرون في شريحة لحم مشوي يسيل لها اللعاب، وفي الحقيقة إن هناك ارتباطًا قويًّا جدًّا في الذهن بين البروتينات واللحوم، نشأ في الأصل بلا شك مما نراه من عروض الطهي ومجلات وكتب الطهي والتغذية وبرامج التليفزيون وغير ذلك. فلتأكل اللحم إذن لتحصل على البروتينات، وإذا كنت نباتيًّا، فاحرص على أن تأكل الكثير من المكسرات والبذور والبقول. والنباتيون بصفة عامة لديهم إدراك للمكونات الغذائية أكثر من آكلي اللحوم. إننا نحتاج إلى تناول البروتينات للوفاء باحتياجاتنا من النيتروجين من الغذاء، الذي نحتاجه بدوره لصنع بروتينات جديدة في أجسامنا، فضلًا عن مادة الدي إن إيه الوراثية وكلاهما غنيٌّ بالنيتروجين. وليس من الصعب كثيرًا أن نؤمِّن لأنفسنا نظامًا غذائيًّا متوازنًا، حتى إذا كنا نباتيين، ولكن لأننا من ذوي الدم الحار؛ فنحن نأكل الكثير بطبعنا. وقد أشار كلاسين ونوليت إلى أن هذا لا ينطبق على الحيوانات ذوات الدم البارد مطلقًا؛ فهي لا تأكل كثيرًا، وهذا يُمثِّل مشكلة لها تثير الاهتمام حقًّا.

القليل جدًّا من العظايا في العصر الحالي نباتية التغذية (عواشب)، وليس هناك من الـ ٢٧٠٠ نوع من الثعابين ما هو نباتي التغذية. بطبيعة الحال هناك بعض العظايا نباتية الغذاء، ولكنها تَمِيل لأن تكون إما كبيرة الحجم نسبيًّا مثل الإيجوانا، وإما أكثر نشاطًا ودرجات حرارة أجسامها أعلى من العظايا اللواحم. وعلى العكس من اللواحم التي تنخفض درجات حرارة أجسامها أسرع، وتسقط في حالة من السبات كلما دَعَتِ الحاجة، فإن العظايا العواشب تكون أقل مرونة بكثير ويتعيَّن عليها أن تتدبَّر شئونها. كان هذا يُعزى من قبل إلى صعوبات هضم المواد النباتية، وهذا الهضم تساعد في إنجازه الميكروبات المعوية التي يمكنها تخمير المواد النباتية عسيرة الهضم، وهي عملية تتم بشكل أفضل عند درجات حرارة أعلى. وبالرغم من ذلك يقول كلاسين ونوليت إنه قد يكون هناك سبب آخر يتعلَّق بالمحتوى النيتروجيني للمواد النباتية. وقد أوردا بيانًا تفصيليًّا عن مقادير النيتروجين الغذائي وأثبتا أن العظايا العواشب تعاني بالفعل من مشكلة كبيرة.

تخيَّلْ أنك تأكل النباتات فقط، التي يقل فيها النيتروجين. فكيف يمكنك أن تحصل على كفايتك من النيتروجين من غذائك؟ حسنًا؛ يمكن أن تُجرِّب أكل تنوُّع أكبر من النباتات، وأن تأكل البذور ... إلخ، ولكن حتى في هذه الحالة من المرجَّح أن تعاني نقصًا ملحوظًا، أو يمكنك ببساطة أن تأكل كميات أكبر. وإذا كنت تحصل مثلًا على خُمس احتياجاتك اليومية فقط من النيتروجين بأن تأكل دلوًا من أوراق النبات، فأنت بحاجة لأن تأكل خمسة دلاء لكي تحصل على احتياجاتك كلها. ولو أمكنك فِعْلُ هذا فسوف يدخل جسمَك فائضٌ ضخمٌ من الكربون الذي تزداد نسبته كثيرًا في المواد النباتية، وسيتعيَّن عليك أن تَجِد وسيلةً ما للتخلُّص منه، فكيف؟ بأن تحرقه وحسب، على حدِّ قول كلاسين ونوليت. إن الغذاء النباتي الصِّرْف ملائمٌ للحيوانات ذوات الدم الحار؛ إذ إننا نحرق ملء دلاء من الكربون طوال الوقت، ولكنه يمكن دائمًا أن يُسبِّب الضرر للحيوانات ذوات الدم البارد. وفي هذا السياق، قد يكون من المفيد أن نُعِيد النَّظَر إلى الليستروصورات؛ التي كانت من العواشب، والسينودونتات؛ التي كانت خليطًا من العواشب واللواحم. فهل يمكن أن تكون خاصية الدم الحار قد نشأت في السينودونتات بسبب ما كان لديها من قدرة هوائية عالية — وهو شرط ضروري للبقاء في تلك الأزمنة الصعبة — مقترنة بغذاءٍ غنيٍّ بالنباتات. فحينما نشأت خاصية الدم الحار في تلك العواشب المبكرة ربما استفادت بسهولة من الطاقة الزائدة حتى تتعافى سريعًا، ولكي تجول قاطعة أميالًا في أراضي العصر الترياسي القاحلة بحثًا عن الطعام أو هربًا من المفترسات. ولعل تلك المفترسات كانت احتياجاتها الغذائية أقلَّ بالنسبة للدم الحار، ولكن كان يتعيَّن عليها أن تتنافس مع تلك العواشب سريعة الحركة. وربما احتاجت ميزة الدم الحار لكي تجاري سرعة هروب فرائسها العاشبة.

ولكن ماذا عن الديناصورات الهائلة، وهي أشهر العواشب في التاريخ؟ هل اتبعتَ استراتيجية بديلة لتحصل على نفس النتائج؟ إنك إن أكلتَ خمسة دلاء من أوراق النبات، ولم تحرقها فورًا وباستمرار، يمكنك ببساطة أن تختزنها بجسمك، وأن يزداد حجمك، فتصير عملاقًا. والعمالقة لا يقتصر بهم الأمر على وجود قدرة أو سعة تخزينية زائدة لديهم، بل إنهم دائمًا ما تكون لديهم سرعة أيض أبطأ كذلك، تتوازن مع التقلُّب الأبطأ للبروتينات والدي إن إيه؛ مما يُقلِّل من الاحتياج الغذائي للنيتروجين. وهكذا، هناك طريقتان معقولتان لمجابهة مشكلة الغذاء الغني بالنباتات، وهما: أن يكون حجم الحيوان أكبر مقترنًا بأيض أبطأ، أو أن يكون حجمه أصغر مقترنًا بأيض أسرع. ومن

الواضح أنهما بالضبط الاستراتيجيتان المتبعتان مِنْ قِبَل العظايا العاشبة في يومنا هذا، وإن كان من المحتمل أن يَحُول هذا دون نَيْلها لميزة الدم الحار بسبب ما لديها من قدرة هوائية منخفضة متأصلة فيها. (وهناك تساؤل آخر عن كيفية نجاة هذه العظايا من الانقراض في العصر البرمي، لكن الإجابة عنه تأتي في موضع آخر.)

لكن لماذا صارت الديناصورات بهذه الضخامة وقتئذٍ؟ لم تتم الإجابة قط عن هذا السؤال بشكل مُرْضٍ بالرغم من محاولات كثيرة. ووفق ما ورد في اقتضاب في دراسة أجراها عام ٢٠٠١ جاريد دياموند وزملاؤه فإن الإجابة — نظريًّا — قد تكمن في ارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون في ذلك العصر؛ مما يرجح أنه حث على حدوث إنتاجية أولية عالية، أي نمو نباتي أسرع. لكن دياموند لم يفطن إلى ما فطن إليه كلاسين ونوليت عن النيتروجين. فصحيح أن ارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون يُسبِّب زيادة في الإنتاجية، إلا أنه أيضًا يُسبِّب انخفاضًا في المحتوى النيتروجيني للمواد النباتية، وهو مجال بحثي نما واتسع بسبب الهموم المتعلقة بالتأثير الذي قد يلحقه ارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون بما في كوكبنا الأرضيِّ من أغذية. ومن ثم كانت المشكلة التي واجهت السينودونتات والديناصورات أكثر حدة وقتئذٍ مما هي اليوم، وهي حصولها على ما يكفي من النيتروجين في غذائها؛ إذ احتاجت حتى للمزيد من النباتات. فالعواشب الصرفة كانت ستحتاج إلى تناول كميات هائلة منها.

ولعل هذا يُفسِّر السبب في أن الثيروبودات لم تحتَجْ إلى ميزة الدم الحار. إذ كانت من اللواحم، ومن ثم لم تُجابِه مشكلة توازن النيتروجين. ولكن على العكس من السينودونتات اللاهثة التي اضطرت إلى التنافس، ندًّا لندٍّ، مع العواشب سريعة الحركة، كانت الثيروبودات فوق كل ذلك؛ إذ كانت لديها رئات مضخية ماصة فائقة الكفاءة، وكان بإمكانها الإمساك بأي شيء يتحرك.

لم تتحوَّل الرابتورات الفريدة إلى التغذية النباتية إلا فيما بعد، في العصر الطباشيري. وكان من أوائلها بالفعل أحد المانيرابتورات من نوع يُسمَّى «فالكاريوس يوتاهنسيس» الذي وُصِفَ رسميًّا بمجلة «نيتشر» في عام ٢٠٠٥ مِنْ قِبَل فريق من ولاية يوتا الأمريكية، وبصفة غير رسمية مِنْ قِبَل كاتبة تُدعى لينزي زانو، بأنه «قمة الغرابة، وأنه هجينٌ من النعامة والغوريلا وإدوارد ذي الأيدي المقصات.» ولكنه كان حلقة مفقودة أصلية — فنصفه رابتور ونصفه عاشب — وكان يعيش تقريبًا في زمن ظهور أوائل النباتات المزهرة اللذيذة؛ وهو زمنٌ حَدَثَ فيه إغراء غير مسبوق لاتباع أسلوبِ حياة نباتيٍّ

التغذية. ولكن من منظور هذا الفصل لعلَّ أهم حقيقة عن الفالكاريوس أنه كان جزءًا من مجموعة تُسمَّى المانيرابتورات، التي يُعتقَد أن الطيور قد نشأت منها. فهل يُحتمَل أن نشوء خاصية الدم الحار في الطيور كان أيضًا مرتبطًا بتحوُّل في النظام الغذائي نحو التغذية النباتية؛ ومن ثمَّ حدث احتياج غذائي كبير للنيتروجين؟ هذا أمر معقول إلى حدٍّ ما.

وهكذا نختم هذا الفصل بهذا التخمين، بَيْدَ أنَّ التخمين يمكن بسهولة أن يلبس ثوب الفرضية أو النظرية، وقد وصفه مِنْ قَبْلُ بيتر ميداوار بأنه قفزة تخيلية نحو المجهول؛ وهذا هو أساس العلم الصالح كله. أمامنا الكثير مما يجب فحصه أو اختباره، ولكن إذا شئنا أن نكشف اللثام عن أسباب وتيرة حياتنا السريعة، فقد نحتاج إلى أن ننظر لما وراء أسس الفسيولوجيا، وإلى قصة الحياة نفسها، أن ننظر إلى زمن في تاريخ كوكبنا لعبت فيه الظروف المتطرفة دورًا كبيرًا. وربما تكون تلك دراسة تاريخية أكثر منها دراسة علمية، بمعنى أنه لم تكن ثمة ضرورة لسير الأمور على هذا النحو، بَيْدَ أنها سارت كذلك وحسب. وإذا لم تكن كارثة الانقراض في العصر البرمي قد وقعت، أو لم يقع ما تَبِعَها من انخفاض طويل الأمد في الأكسجين، فهل كانت القدرة الهوائية العالية ستصير مسألة حياة أو موت؟ وهل كانت الحياة ستتطوَّر لما بعد مرحلة الرئة الزاحفية البدائية؟ وإذا لم يتحوَّل القليل من تلك الحيوانات المشحونة هوائيًّا نحو المعيشة النباتية، فهل كانت خاصية الدم الحار ستظهر؟ ربما كان هذا مجرد تاريخ، ولكن قراءة ذلك الماضي البعيد هو علم في حَدِّ ذاته، علم يمكن أن يثري فهمنا وتقديرنا للحياة.

الفصل التاسع

الوعي

جذور العقل البشري

في عام ١٩٩٦، كتب البابا يوحنا بولس الثاني رسالة شهيرة إلى الأكاديمية الأسقفية للعلوم، اعترف فيها بأن عملية التطور هي أكثر من مجرد فرضية. وقال: «جدير بالذكر حقًّا أن هذه النظرية قد تزايد قبولها من جانب الباحثين، على إثر ظهور سلسلة من الاكتشافات في حقول مختلفة من المعرفة. وإن التقارب غير المتعمد وغير الملفق بين نتائج الدراسات التي أُجْرِيَتْ بشكل مستقل هو في حدِّ ذاته برهان جوهري في صالح هذه النظرية.»

إلا أن البابا مع ذلك — وهو أمر غير مستغرب — لم يسلِّم بكل ما وَرَدَ ذِكْرُهُ بشأن هذه النظرية؛ إذ قال إن العقل البشري يتجاوز دائمًا حدود العلم المادي و«إن نظريات التطور، التي — تبعًا للفلسفات التي تستلهمها — ترى العقل منبثقًا من قوى المادة الحية أو مجرد ظاهرة ثانوية ناتجة عن هذه المادة، إنما تتضارب مع حقيقة الإنسان. كما أنها لا تستطيع أن تدعم كرامة الفرد.» وأردف قائلًا إن الخبرات الروحية والوعي الذاتي، وكل المنظومة الغيبية التي نتواصل عن طريقها مع الرب، لا تتأثر بالمقاييس المادية للعلم، بل تندرج ضمن عالَمَيِ الفلسفة واللاهوت. وبمختصر القول، فإن البابا بينما يعترف بواقعية عملية التطور، لكنه كان حريصًا على وضع سلطة الكنيسة فوق عملية التطور.[1]

ليس هذا كتابًا عن الدين، ولا أرغب في مهاجمة معتقدات شخص كرَّس نفسه لها. ومع ذلك، فنفس الأسباب التي دَعَتِ البابا لأن يكتب عن التطوُّر (قائلًا: «إن سلطة

الكنيسة معنيَّة على نحوٍ مباشرٍ بمسألة التطوُّر؛ لأنها تشمل مفهوم الإنسان.») جعلت العلماء يهتمون بالعقل؛ لأنه يشمل مفهوم التطور. فإذا لم يكن العقل نتاجًا للتطور فماذا يكون إذن؟ وكيف يتفاعل مع المخ؟ إن المخ كيان مادي؛ ومن ثَمَّ يُفترَض أنه نتاج للتطور مثل مخاخ الحيوانات التي تتشابه في كثير من تراكيبها، إن لم يكن كلها، مع المخ البشري. ولكن إذا كان الأمر كذلك، فهل يتطور العقل كما يتطور المخ، على سبيل المثال، أثناء كِبَر حجم المخ في الجماجم قبل البشرية على مدى ملايين السنين القليلة الماضية (وبالتأكيد هذا ليس موضوع نزاع علمي)؟ وفي هذا الشأن نتساءل أيضًا: كيف تتفاعل المادة والروح عند المستوى الجزيئي، كما يُفترَض أن يكون الحال؛ فكيف يمكن أن تُؤثِّر العقاقير أو إصابات المخ على العقل؟

كتب ستيفن جاي جولد بشكل إيجابي عن مجالين عظيمين غير متداخلين هما العلم والدين، ولكن كان حتميًّا أن تُوجَد بعض النقاط التي يجب أن يتلاقى عندها الاثنان ويتداخلا. ويُعتبَر الوعي المثال الأبرز لها. هذه القضايا تضرب بثقلها في أعماق التاريخ. وحتى الفيلسوف الفرنسي ديكارت، حينما افترض وجود فَصْلٍ بين الروح والمادة، لم يكن في الحقيقة يفعل أكثر من تأييد وترسيم فكرة لها جذور تاريخية وتدعمها الكنيسة باعتباره كاثوليكيًّا مخلصًا، ولم يكن لديه رغبة في التعرُّض للإدانة مِنْ قِبَل الكنيسة كما حدث لجاليليو؛ فبترسيم هذا الفصل حرَّرَ ديكارت الجسم وحتى المخ، للدراسة العلمية. وعلى العكس من البابا، يندر أن نَجِد من العلماء من يُؤيِّد الازدواجية الديكارتية صراحة، بمعنى الاعتقاد بالفصل بين الروح والمادة، ولكن هذا المفهوم ليس بالأمر السخيف، والتساؤلات التي طرحتها توًّا هي عرضة للاستكشاف العلمي. وميكانيكا الكم، على سبيل المثال، لا تزال تفتح الباب للمزيد من الأعاجيب الكونية للعقل، كما سنرى لاحقًا.

إنني أستشهد بكلام البابا لأنني أعتقد أن ما قاله يتجاوز حدود الدين؛ إذ يمس مفهوم تصوُّر الإنسان لنفسه. وحتى غير المتدينين قد يشعرون بأن أرواحهم — بكيفية ما — غير مادية، وأنها بشرية بشكل مميز، وأنها — بطريقة ما — «تتجاوز العلم المادي». إن قليلين فقط ممن قرءوا هذا الكتاب حتى هذه النقطة هم من سيشعرون أن العلم لا يحق له أن يفرض وصاية على الوعي، ولكن ربما بنفس القدر قليلون فقط هم من سيعطون علماء التطور حقوقًا خاصة تُخوِّلهم التسيُّد على مجموعة من فروع المعرفة والدراسة التي يمكن أن تزعم أن لها رؤًى متعمقة؛ مثل علم تصميم الروبوتات، والذكاء الاصطناعي، والعلوم اللغوية، وعلم الأعصاب، وعلم العقاقير، وفيزياء الكم، والفلسفة،

واللاهوت، والتأمل، وفلسفة الزن، والأدب، وعلم الاجتماع، وعلم النفس، والطب النفسي، وعلم الإنسان، وعلم السلوك عند الحيوانات، وغيرها.

وعليَّ أن أقول منذ البداية إن هذا الفصل يختلف عن سائر فصول هذا الكتاب في تأكيده أن الأمر لا يقتصر على عدم معرفة العلم المادي (بعد) للإجابة عن التساؤلات السابقة، بل إننا كذلك في الوقت الحاضر يصعب علينا إدراك الكيفية التي قد تبدو عليها هذه الإجابة في ضوء القوانين المعروفة للفيزياء أو علم الأحياء أو المعلومات. ولا يُوجَد اتفاق بين دارسي العقل البشري على الكيفية التي يؤدِّي بمقتضاها تحفيز الخلايا العصبية إلى الأحاسيس الشخصية القوية.

لكن هذا سبب أقوى يجعلنا نتساءل أكثر عما يمكن أن يخبرنا به العلم عن أنشطة العقل البشري، وأين تصطدم تلك الجهود بحائط المجهول. يتراءى لي أنَّ وضع البابا هذا قابلٌ للدفاع عنه؛ حيث إننا لا نعرف كيف تُولَد «المادة وحدها»؛ ذلك العقل اللامادي الذي ندركه، بل إننا لا نعرف حتى ماهية تلك المادة المجردة تمامًا، ولا السبب وراء وجود المادة من الأساس عوضًا عن عدم وجودها (وهو تساؤل مماثل من بعض النواحي للتساؤل حول سبب وجود الوعي، بدلًا من وجود عملية معالجة لا واعية للمعلومات وحسب). ومع ذلك، أظن — أو ربما يجب أن أقول إنني أومن — أن التطوُّر يُفسِّر أكثر معالم العقل روحانية.[٢] وأكثر من هذا، فإن الأنشطة المعروفة للعقل البشري أكثر روعة بكثير مما يستطيع العقل الغافل حتى أن يتخيله، وأن هناك أسبابًا وجيهة لإرساء كرامة الفرد على أساس سمو العقل البيولوجي.

ثمة أسباب قهرية أخرى تدعو العلم لأن يَقْبَل التحدي؛ فليس العقل البشري دائمًا هو الوعاء الثري الذي نُثمِّنه، بل هناك تلك الأمراض المخية التي تسلب العقل أنشطته. فمرض ألزهايمر، مثلًا، يسلب الإنسان هويته شيئًا فشيئًا، إلى أن يَصِل به في النهاية إلى أن يَصِير عديم الكيان. والاكتئاب الشديد مرض شائع جدًّا، وهو حالة خبيثة من الحزن تستهلك العقل من الداخل، أما الفصام العقلي (الشيزوفرينيا) فيأتي إلى العقل بأشد الأوهام قسوة وقربًا من الواقع في صورة هلاوس متنوعة، بينما تعمل بعض النوبات الصرعية على إذابة العقل الواعي كليةً، سالبة منه الوعي. وهذه الحالات تعطي انطباعًا رهيبًا بهشاشة العقل البشري. ثمة عبارة شهيرة وردت على لسان فرانسيس كريك يقول فيها: «إنك لست سوى كومة من الخلايا العصبية.» ولربما كان عليه أن يُضِيف أن تلك الخلايا تُشكِّل بيتًا هشًّا من أوراق اللعب. وإذا لم يعمل المجتمع والعلم جاهدَيْن على

فهم تلك الحالات ومحاولة علاجها؛ فإن هذا سيكون إنكارًا للنعمة العظمى التي تُقدِّرها الكنيسة أشدَّ تقدير.

إن أول مشكلة تواجه أي حديث علمي عن موضوع الوعي هي التعريف؛ فهناك تعريفات عديدة للوعي. فإذا عرَّفنا الوعي بأنه إدراك «الذات» المنطمرة في العالَم — وهو إدراك ذاتي غني يعرِّف الفرد في إطار المجتمع والثقافة والتاريخ، بما يحمل من آمال ومخاوف عن المستقبل، وكل هذا محجوب في ثنايا الرمزية الكثيفة التأملية للغة — تكون البشرية بالطبع شيئًا فريدًا. إن هناك فجوة كبيرة بين البشر والحيوانات، فلا يمكن أن يحظى أيٌّ من الحيوانات بشرف هذه الكلمة، أي الوعي، بل ولا حتى أسلافنا ولا صغارنا.

ولعلَّ إعلاء شأن هذا المفهوم وَرَدَ في كتاب غريب، عنوانه «منشأ الوعي مع انهيار العقل الثنائي»، بقلم عالم النفس الأمريكي جوليان جاينس. وقد لخَّصَ الأمر قائلًا: «في فترةٍ ما كانت الطبيعة البشرية منقسمةً إلى عنصرين: عنصر مهيمن هو الرب، وعنصر تابع له هو الإنسان، ولم يكن أيٌّ منهما مدركًا بشكل واعٍ.» ما يثير التعجُّب أن جاينس حدَّد وقت حدوث هذا في زمن حديث للغاية في مرحلة ما بين تأليف ملحمتَي الإلياذة والأوديسة. (بطبيعة الحال، يزعم جاينس أن هاتين الملحمتين المختلفتين جدًّا قد ألَّفَهما شاعران إغريقيان اثنان يحمل كلٌّ منهما اسم هوميروس، ولكن تفصل بينهما مئات السنين.) النقطة المهمة هنا هي أن الوعي في نظر جاينس هو بنية اجتماعية ولغوية خالصة، وأنه شيء حديث نسبيًّا، وأن العقل يكون واعيًا فقط حينما يصير «مدركًا» أنه واعٍ. يمكن تقبُّل رأي جاينس دون بأس، ولكن أي رأي يبالغ في تقدير الأمور لدرجة أنه يستبعد مؤلف ملحمة الإلياذة من دائرة الوعي لا بد أن نعتبره رأيًا متطرفًا. فإذا لم يكن هوميروس الأول واعيًا، فهل كان مجرد زومبي غير واعٍ؟ وإذا لم يكن الأمر كذلك، فلا بد أن هناك صورًا ودرجات من الوعي، وتكون الصورة الأعلى منها هي الإدراك الذاتي، أو إدراك الذات بوصفها عضوًا حرًّا ومثقفًا في المجتمع، وتكون بقية الصور أدنى منها.

أغلب علماء الأعصاب يضعون فارقًا بين صورتين من الوعي، لدى كلٍّ منهما جذور في بنية المخ. تختلف المصطلحات والتعاريف، ولكن يمكننا القول بصفة أساسية إن مصطلح «الوعي الممتد» يشير إلى الأمجاد الكبيرة للعقل البشري، التي ما كانت لتحدث لولا عوامل اللغة والمجتمع ... إلخ، أما الوعي «الأولي» أو «المركزي» فهو أكثر حيوانية في طبيعته تمامًا؛ إذ يتعلَّق بالعواطف والدوافع والألم، وهو إحساس بدائي بالنفس ينقصه

منظور ذاتي أو إحساس بالموت، وإدراك للأشياء المادية في العالم؛ مثل عالم الثعلب، الذي إذا وقع في فخ ذي فكين، فقد يقضم ساقه ليهرب. وكما أورد العالم الأسترالي البارز ديريك دنتون في كتابه الرائع عن الوعي الحيواني، وعنوانه «العواطف الأولية»، فإن الحيوان يدرك بالتأكيد أنه وقع بين فكي الفخ، فيعقد النية على أن يتحرر منه. إن لديه قَدْرًا من إدراك النفس، ولديه خطة ما.

من قبيل المفارقة أن الوعي الممتد سهل التفسير نسبيًّا، حتى إذا استوجب الأمر تحديد مدلول كلمة «سهل». مع الوضع في الاعتبار المعنى الأولي للوعي؛ فلا شيء في الوعي الممتد يتجاوز الفهم المادي للعالم، فهناك وحسب دوائر كهربائية موازية رهيبة في المخ موضوعة في الإطار المعقَّد للمجتمع. ولا شيء إعجازي فيما يختص بالمجتمع ذاته، على سبيل المثال. ومن الواضح أن الطفل الذي يتربَّى منعزلًا داخل كهف مثلًا، لن يكون لديه من الوعي أكثر من الوعي البدائي. وكذلك، وبنفس الدرجة، إذا افترضنا أن بُعِثَ إلى الحياة إنسان كرومانيوني بدائي من عصر ما قبل التاريخ في فرنسا (الذي كان يعيش في الكهوف)، وتولَّيْنا تربيته في باريس في عصرنا هذا، فسيكون من المتعذر تمييزه عن سائر الفرنسيين الآخرين المعاصرين. نفس الأمر ينطبق على اللغة؛ فأغلب الناس يجدون استحالة في وجود أي صورة من الوعي المتطور لدى شخص أو حيوان محروم من اللغة، وهذا أمر حقيقي بصفة مؤكدة تقريبًا. لكن ليست اللغة شيئًا سحريًّا؛ إذ يمكن برمجة اللغة داخل إنسان آلي (روبوت) بما يجعله يجتاز اختبارًا للذكاء (مثل اختبار تورنج) دون أن يكون الروبوت واعيًا حقًّا أو حتى يمتلك إدراكًا أساسيًّا. الذاكرة أيضًا قابلة للبرمجة بوضوح. ونحمد الرب على أن الكمبيوتر الخاص بي يمكنه تذكُّر أي كلمة أكتبها عليه. وحتى «التفكير» قابِلٌ للبرمجة، ولنتذكَّرْ ذلك الكمبيوتر المخصص للعب الشطرنج المسمَّى «التفكير العميق» (وسُمِّي هكذا تبعًا لرواية «دليل المسافر إلى المجرة») والنموذج التالي له المسمى «الأزرق العميق»، الذي تمكَّنَ في عام ١٩٩٧ من هزيمة ملك الشطرنج وبطل العالم جاري كاسباروف.[٣] فإذا كان البشر يستطيعون برمجة تلك الأجهزة فكذلك يستطيع الانتقاء الطبيعي بلا أدنى شك.

لا أريد أن أقلِّل من شأن أهمية المجتمع واللغة والتفكير للوعي الإنساني؛ فمن الواضح أن الوعي يَنْهَل من تلك الأمور جميعًا. ولكن النقطة التي أريد التركيز عليها هي أنك حتى تكون واعيًا، يجب أن تعتمد كل هذه الأمور على وجود صورة من الوعي أكثر عمقًا، وأعني المشاعر. فمن السهل أن تتخيَّل روبوتات لها القدرة المخية لكمبيوتر

«الأزرق العميق» مع إمكانات لغوية، ومستقبِلات حسية للعالم الخارجي، وذاكرة هائلة فائقة، ولكن بلا وعي. فلا فرح ولا أسى ولا حب ولا حزن عند الفراق، ولا ابتهاج بفهم الأشياء ولا أمل ولا ألم، ولا إيمان أو وفاء، أو حب للخير والعطاء، ولا تأثُّر عند استنشاق عطرٍ رقيقٍ أو رؤية جسد جميل رشيق، ولا شعور بدفء أشعة الشمس على الرأس، ولا شعور بالمرارة لقضاء العيد بعيدًا عن الوطن والأهل. ومن يدري؟! لعلَّنا نجد يومًا روبوتًا له مشاعر في دوائره الإلكترونية، ولكن حتى الآن لا نعرف كيف نبرمج المشاعر الجياشة الخفية.

هذا هو نفس النطاق الداخلي الذي افترض البابا أنه يندرج تحت ما أسماه سلطة الكنيسة، والذي وصفه الفيلسوف الأسترالي ديفيد تشالمرز وصفًا شهيرًا — في نفس الوقت تقريبًا — بأنه «المشكلة الصعبة» للوعي. ومنذ ذلك الحين، جَرَتْ محاولاتٌ كثيرةٌ لحلِّ مشكلات الوعي، وبعضها تَمَّ بنجاح؛ ولكن لم ينجح أيٌّ منها في حلِّ مشكلة تشالمرز الصعبة. وحتى الفيلسوف المتمرد دانييل دنيت، الذي اتُّهِم بإنكار المشكلة كليةً، نجده يذكرها بشكل جانبي ضمن عمله الشهير «تفسير الوعي» والذي ظهر في عام ١٩٩١. وقد تساءل قائلًا: لماذا لا تشعر الخلايا العصبية النشطة بشيء؟ وكان هذا التساؤل في ختام فصله عن الخبرات الواعية الذاتية. ونحن أيضًا نتساءل حقًّا: لِمَ لا؟

إنني عالم في الكيمياء الحيوية، وأعرف مواطن قصورها. وإذا أردتَ استكشاف دور اللغة في تشكيل الوعي فاقرأ لستيفن بينكر. إنني لم أضع الكيمياء الحيوية ضمن قائمة الأشياء التي تزعم أن لها خبرة بموضوع الوعي. وقليل هم علماء الكيمياء الحيوية الذين حاولوا بجدية أن يتناولوا موضوع الوعي. وربما كان كريستيان دي دوف استثناء لهذا. ومع ذلك تُعتَبَر مشكلة تشالمرز الصعبة بحقٍّ مشكلة في الكيمياء الحيوية؛ إذ كيف يُولِّد تنشيطُ الخلايا العصبية «شعورًا» بأي شيء؟ وكيف تُولِّد أيونات الكالسيوم المندفعة خلال غشاء عصبي الإحساسَ باللون الأحمر أو بالخوف أو الغضب أو الحب؟ دَعْنا نضع هذا السؤال في بالنا ونحن نستكشف طبيعة الوعي المركزي، ولماذا يؤدِّي الوعي المركزي إلى تنشيط شعورٍ ما. وحتى إذا لم أستطع الإجابة عن هذا السؤال، فإنني آمل أن أصوغه بوضوح يكفي لأن أرى أين يمكنني البحث عن إجابة له. ولستُ أظن الإجابة في السماوات العلا، وإنما هنا على الأرض، بين أسراب الطيور وأفواج النحل.

أول شيء يجب أن نفعله هو أن نتخلَّص من الفكرة القائلة إن كل ما يبدو وكأنه ينتمي إلى الوعي فهو من الوعي حقًّا. فهذا ليس واقع الحال. فمثلًا، يبدو الوعي مُوحَّدًا، بمعنى أنه غير مُقسَّم إلى أجزاء. فنحن لا نملك تيارات منفصلة من الوعي تسري في رءوسنا، وإنما نملك إدراكًا واحدًا متكاملًا، يتغيَّر مع ذلك باستمرار، منتقلًا من ثانية لأخرى خلال تشكيلة لانهائية من الحالات. فالوعي يبدو مثل شريط سينمائي في الرأس؛ إذ تتكامل صور الفيلم مع أصواته، وأيضًا مع الروائح واللمسات والمذاقات والعواطف والمشاعر والأفكار، وكل ذلك مرتبط بإحساس بالنفس، التي تثبت كياننا الكلي وخبراته الشخصية بأجسامنا.

ليس عليك أن تُفكِّر في الأمر طويلًا كي تدرك أن المخ يجب أن يربط المعلومات الحسية معًا بطريقة ما ليعطي «إدراكًا» بكيان كلي متكامل لا ينفصم. تدخل المعلومات من العينين والأذنين وفتحتي الأنف، وعن طريق اللمس أو الذاكرة أو الأمعاء، إلى أجزاء مختلفة من المخ حيث تتم معالجتها بشكل مستقل، وفي النهاية تؤدي إلى نشوء إدراكات مختلفة للألوان والروائح واللمس والجوع والعطش. لا شيء من ذلك «حقيقي»، وإنما هي أعصاب تنشط، غير أننا نادرًا ما نخطئ بالخلط بين الأشياء التي «نراها» فنظنها من الروائح أو الأصوات. صحيح أن شبكية العين تتكوَّن عليها بالفعل صورة مقلوبة للعالم الذي أمامنا، إلا أن هذه الصورة لا يراها المخ مطلقًا على شريط سينمائي، ولكنها تتحوَّل إلى أنماط من خلايا عصبية تُنبِّه العصب البصري، على نحو أشبه ما يكون بآلة الفاكس. ويحدث الأمر نفسه تقريبًا حينما نسمع أو نشم؛ فلا شيء يدخل من العالم الخارجي إلى داخل رءوسنا، ولكنها أعصاب تطلق شحنات عصبية. ونفس هذا ينطبق على البطن حينما يتألم، فلا ألم حقيقي بالبطن، وإنما هي الأعصاب كما ذكرنا.

وإننا لكي نشعر بكل تلك الأحاسيس بشكل واعٍ، لحظة بلحظة، على نحوٍ أشبه بفيلم يُعرَض داخل الرأس، فهذا يتطلَّب تحويل جميع النقط والشرط الرقمية إلى إدراك «للعالم الحقيقي»، بجميع مشاهده وروائحه. ثم إننا، بالطبع، لا ندرك هذا العالم المعاد بناؤه على أنه موجود داخل رءوسنا، وإنما نسقط هذا كله إلى حيث ينتمي. إننا نرى العالم وكأنما من فتحة واحدة موجودة في مقدمة الجمجمة، لكن هذا وَهْمٌ كما هو واضح تمامًا. كل هذا يتضمن الكثير من الخداع العصبي. ومن الواضح بنفس الدرجة، أن الاتصالات والمسارات العصبية مهمة. فإذا قُطِع العصبان البصريان فسيُصاب المرء بالعمى. وعلى العكس من هذا، إذا تمَّ تنبيه المراكز البصرية في المخ لدى شخص أعمى،

باستخدام مجموعة مزروعة من الأعصاب الكهربية الدقيقة، فسوف يرى صورًا تولَّدَتْ من المخ مباشرةً، حتى وإن كانت مجرد صور بدائية. هذا هو أساس الإبصار الاصطناعي؛ وهو مجال علمي لا يزال في بداياته ولكنه قابل للتطبيق من حيث المبدأ. ويقوم فيلم «ذا ماتريكس» على أساس نفس الفكرة؛ حيث يتم تنشيط جميع الخبرات بينما الإنسان، ومن ثم المخ، محفوظ في وعاء.

يمكن الاستدلال على مقدار ذلك الخداع العصبي الذي ذكرناه من واقع مئات من الحالات الشاذة أو الغريبة — بدرجة فظيعة — التي تَرِد في الإصدارات السنوية لعلم الأعصاب، التي تستثير لدى أغلبنا فكرة «كان سيحدث لنا هذا لولا رحمة الرب.» وقد نقَّبَ في هذا الأرشيف أوليفر ساكس وآخرون. ولعل أشهر حالة ذكَرَها ساكس هي حالة «الرجل الذي ظنَّ زوجته قبعة»، وقد اقتبسها الكاتب مايكل نايمان ووضعها في قالب من أوبرا الحجرة، ثم تحوَّلَتْ فيما بعد إلى فيلم سينمائي. كان الرجل المذكور والمشار إليه باسم «دكتور بي» موسيقيًّا مرموقًا، ولكنه كان يعاني من حالة مرضية عصبية تُسمَّى العَمَه البصري أو «فَقْد الإدراك البصري». كان بصر الرجل سليمًا تمامًا، ولكن قدرته على تعرُّف الأشياء وتمييزها بصورة صحيحة، ولا سيما الوجوه، صارت متدهورة بشكل يُرثى له. وحينما ذهب لاستشارة ساكس كان يظن أن قَدَمه هي حذاؤه، وبعد ذلك، حينما حاول أن يأخذ قبعته ليرتديها، أمسك بدلًا منها رأس امرأته. كانت هذه الحالة ناتجة عن تحلل عصبي لمنطقة في المخ مسئولة عن المعالجة البصرية (وهي ناتجة بدورها عن صورة غير عادية لمرض ألزهايمر)؛ مما قلص عالمه البصري إلى مجرد أنماط لا معنى لها من الأشكال والألوان والحركات النظرية التجريدية، بينما لم يؤثِّر ذلك على قدرته العقلية الإبداعية ولا قدرته الموسيقية الفذة.

من حسن الطالع أن هذا النوع من التحلل العصبي نادر، ولكن من وجهة نظر علم الأعصاب الطبي المتشدد ما هذه إلا حالة واحدة من مجموعة من الحالات. فهناك حالة أخرى ناتجة عن تلف في منطقة محدودة أخرى في المخ، وتُعرَف الحالة باسم «متلازمة كابجراس». وفي هذه الحالة يكون المريض قادرًا على تمييز الناس بصورة جيدة تمامًا، ولكن يكون لديه اعتقاد شاذ بأن شريك حياته أو والديه ليسوا كما يبدون، ولكنهم محتالون مخادعون احتلوا مكانهم. ولا تتعلق المشكلة بالناس عامةً، وإنما تتعلق فقط بالأصدقاء المقربين أو أفراد الأسرة؛ أي الأشخاص القريبين جدًّا من الناحية العاطفية. وفي هذه الحالة تكمن المشكلة في الأعصاب التي تربط بين المراكز البصرية والمراكز

العاطفية في المخ (مثل لوزة المخ). فإذا حدث قطع لهذه الروابط أو حدثت سكتة دماغية أو إصابة موضعية أخرى (كأحد الأورام) فإن هذا يمنع حدوث الاستجابة العاطفية الطبيعية لرؤية أحد الأحبة، وهي استجابة يمكن الكشف عنها بجهاز كشف الكذب. وكما قال إخصائي علم الأعصاب في إس راماتشاندران بأسلوب تهكمي: حتى إذا لم تكن ولدًا يهوديًّا طيبًا، فإن رؤيتك لأمك تجعل يديك تعرقان. والعرق يُغيِّر المقاومة الكهربائية للجلد، وهو ما يسجله جهاز كشف الكذب. ولكن المرضى بمتلازمة كابجراس لا يعرقون حينما يرون من يحبون؛ فعَيْنا المريض تخبرانه بأن هذه هي أمه، ولكن مراكزه المخية العاطفية تفشل في إقرار هذا الانطباع. ويبدو هذا الفراغ العاطفي أنه الأساس لهذه المتلازمة. فالمخ، وقد ابتُلِي بنقصان في الثبات والتماسك، تقفز إليه أفكار سخيفة وإن كانت منطقية بأن الشخص الذي يراه أمامه محتال. إن العواطف أقوى من الذكاء؛ أو لِنَقُلْ إنها أساس الذكاء.

أما متلازمة كوتارد فهي أكثر غرابة. وفيها يكون القصور والخلل أشد عمقًا؛ إذ تصبح جميع الحواس مقطوعة الاتصالات مع المراكز العاطفية للمخ؛ مما يؤدي إلى حالة من التسطح أو الموات العاطفي. فإذا كان كل شيء تتلقاه جميع الحواس يسجل حالة من العدم في سجل العواطف، فإن الاستنتاج الغريب — وإن كان منطقيًّا كذلك — يقول إن هذا الشخص المريض لا بد أن يكون ميتًا. وهكذا يتم ليُّ المنطق لكي يستوعب العاطفة. والمريض بمتلازمة كوتارد يعتقد حقًّا أنه ميت، وقد يدَّعي حتى أنه يشم رائحة لحم متعفن. وهذا المريض سيوافقك على أن الميت لا ينزف، لكن إذا وخزته بإبرة، فسوف يبدو مندهشًا، ثم يسلِّم في نهاية الأمر بأن الميت ينزف حقًّا.[٤]

المقصِد أن ثمة إصابات (أو حالات تلف) محددة للمخ تسبب حالات خلل محددة أيضًا وقابلة للتكرار. ومما لا يثير العجب أن حدوث تلف في نفس المنطقة من المخ يسبب نفس حالة الخلل في أشخاص مختلفين، وبنفس الطريقة في الحيوانات المختلفة. وفي بعض الحالات، تُلحِق حالاتُ التلف هذه الضررَ بعملية المعالجة العصبية الحسية مسببةً حالات مثل عمى الحركة، وهي متلازمة غريبة أخرى؛ إذ لا يستطيع المرء أن يدرك الأجسام المتحركة، ولكنه بدلًا من هذا يرى العالم كأنه مضاء بأنوار الديسكو الوامضة؛ مما يجعل من المستحيل تقريبًا أن يقدِّر سرعة السيارات المتحركة أو أن يملأ حتى كوبًا من العصير. وفي حالات أخرى تُسبِّب حالاتُ تلف أخرى تغيرًا في درجة الوعي ذاته؛ فالمرضى بحالة فقدان الذاكرة المؤقت الشامل لا يستطيعون تذكُّر الماضي

ولا التخطيط للمستقبل، ولا يَعُون سوى ما هو حاضر في زمانهم ومكانهم. أما المرضى بمتلازمة أنطون فيكونون عميانًا ولكنهم ينكرون هذا. والمرضى بحالة إنكار المرض (عمه العاهة) يُصرِّحون بأنهم بخير ولكنهم في الحقيقة مصابون بحالة خلل تشبه الشلل. ويقول الواحد منهم: «لا شيء بي أيها الطبيب، إنني فقط أحصل على قسط من الراحة.» والمرضى بحالة تعذُّر إدراك الألم يشعرون بالألم، ولكنهم لا يدركون خاصيته المؤذية للنفس؛ أي إنهم لا يشتكون من الوجع. والمرضى بالإبصار الأعمى يكونون غير واعين بقدرتهم على الإبصار (فهُمْ عميان بالفعل) ولكنهم مع ذلك قادرون على الإشارة بشكل صحيح إلى الأجسام التي أمامهم إذا طُلِب منهم هذا. وهذه الحالة الأخيرة تم إظهارها عمليًّا في قرود المكاك التي دُرِّبَتْ على الاستجابة كلما رأت (أو فشلت في رؤية) جسم ما. وهي واحدة من حالات مشابهة كثيرة صارت جليَّة بفضل براعة جيل صاعد من علماء علم النفس التجريبي الذين يدرسون الوعي لدى الحيوانات.

يا لها من حالات خلل عجيبة الشأن! ولكن من خلال الدراسات الدقيقة التي أجراها علماء الأعصاب على مدى القرن الأخير أو أكثر تمَّ بحث حقيقتها، وإمكان تكرارها، وأسبابها (السبب في معناه المحدود المتمثل في حدوث حالة تلف في جزء معين من المخ). وتحدث حالات عجيبة بنفس القَدْر من قطع للاتصالات العصبية إذا تمَّ تنبيه أجزاء معينة من المخ بالأقطاب الكهربية. ولقد أُجْرِيَ هذا — منذ بضعة عقود بالأساس — على مئات من الناس كانوا يعانون حالات صرعية شديدة غير قابلة للعلاج، وكانت تسبب في أسوأ درجاتها نوبات تشنجية معممة تؤدي إلى فقدان مفجع للوعي، وأحيانًا ما كانت تؤدي إلى حالة خرف أو شلل جزئي. وكان الكثير من المرضى الذين تُجرى لهم جراحة عصبية لعلاج الصرع يعملون — بإرادتهم وبكامل وعيهم — كحيوانات تجارب وهم يصفون أحاسيسهم شفهيًّا للجراح. وهكذا صرنا نعرف أن تنبيه منطقة معينة من المخ يُولِّد إحساسًا قاهرًا بالاكتئاب، وهو يتبدَّد بمجرد إيقاف التنبيه، وأن تنبيه أجزاء أخرى يُسبِّب خيالات عقلية أو يجلب إلى الذهن مقطوعات موسيقية. وتنبيه بقعة محددة بدرجة كافية يؤدي إلى تجربة الخروج من الجسم؛ إذ يعطي إحساسًا بأن الروح تطفو على ارتفاع ما قرب السقف.

في وقت حديث، استُخدِمَتْ أساليب معقَّدة بارعة للحصول على نتائج مشابهة، باستخدام خوذة تسلط مجالات مغناطيسية ضعيفة لتحدث تغيرات كهربائية في مناطق مخية معينة بدون جراحة. وقد حققت تلك الخوذة شهرة في أواسط التسعينيات، حينما

بدأ مايكل بيرسنجر، بالجامعة اللورنتية في كندا، في تنبيه الفص الصدغي (تحت صدغَي الرأس) ووجد أنه أحدث بدرجة غير قليلة (في ٨٠ بالمائة من الناس) خيالاتٍ روحيةً، وإحساسًا بوجود الرب، أو حتى وجود الشيطان، في الغرفة. ولم تلبث أن عُرِفَتْ بالخوذة الإلهية، وإن كان فريق من الباحثين السويديين قد أبدى شكَّه في هذه النتائج. كما أن مُعِدِّي برنامج «هورايزون» الوثائقي العلمي الذي ينتجه التليفزيون البريطاني قاموا باستضافة أحد الملحدين المشهورين ويُدعى ريتشارد دوكينز إلى كندا لتجربة ما يُسمَّى الخوذة الإلهية عام ٢٠٠٣. ولكن مما خيَّبَ أملهم، بلا شك، أنها لم تُحدِث تجربة روحية مماثلة لدى دوكينز. وقد فسَّرَ بيرسنجر هذا الإخفاق بقوله إن دوكينز كانت درجاته سيئة فيما يتعلَّق بالمقياس النفسي الذي يقيس الميل لحساسية الفص الصدغي؛ بمعنى أن الأجزاء الروحية (أو العقائدية) من المخ كانت — في أفضل أحوالها — مُحيَّدة. إلا أن الكاتبة وعالمة النفس التجريبية المعروفة سوزان بلاكمور كانت أكثر تأثرًا، فقالت: «حينما ذهبتُ إلى معمل بيرسنجر وخضعتُ لخطوات تجربته مررتُ بأغرب خبرات حياتي على الإطلاق ... وسوف أُدهَش إذا تبيَّن لي أنه مجرد تأثير وهمي.» ويجاهد بيرسنجر في توضيح أن إحداث الأحاسيس الخيالية العجيبة بطريقة فيزيائية لا يصطدم مع الإيمان بوجود الرب؛ فلا بد أن هناك «آلية فيزيائية ما لنقل الخبرات والتجارب فوق الطبيعية».

المغزى أن المخ، والعقل بنفس المفهوم، مقسَّمٌ إلى مناطق متخصصة. لسنا واعين مطلقًا بهذه الأنشطة الداخلية. وتتضح هذه الصورة من خلال تأثير بعض العقاقير التي تخامر العقل، والتي تؤثِّر كذلك على مناطق شديدة التحديد. فالعقاقير المهلوسة، مثل إل إس دي، والسيلوسيبين (أحد مكونات بعض أنواع عش الغراب) والمسكالين (مركب يُوجَد في بعض أنواع الصبار)، على سبيل المثال، تؤثِّر كلها على نمط محدد من المستقبلات العصبية (وهي مستقبلات السيروتونين) يُوجَد في خلايا عصبية محددة (وهي الخلايا العصبية الهرمية) في مناطق معينة من المخ (وهي الطبقة الخامسة من القشرة المخية). وكما قال كريستوف كوخ عالم الأعصاب في جامعة كالتك في باسادينا بالولايات المتحدة، فإن تلك العقاقير لا تلحق الضرر والاضطراب بالتوصيلات العصبية للمخ بشكل شمولي. وبالمثل فإن الكثير من العقاقير المضادة للاكتئاب أو المضادة للذهان تتميَّز بتأثيرات محددة الأهداف جدًّا. وهو ما يدل على أن الوعي أيضًا لا ينبع بشكل شمولي من الأعمال العامة للمخ، ولكنه خاصية تتصل بالصفة التشريحية المحددة للمخ

الذي يتكوَّن من عدد من المناطق، وإن كانت تلك المناطق تتعاون في انسجام في جميع الأوقات. ومن الإنصاف أن نقول إنه لا يُوجَد سوى القليل من الاتفاق حول هذا النوع من الأفكار حتى بين علماء الأعصاب، ولكني سأحاول تبرير وجهة النظر هذه في الصفحات التالية.

إن الإبصار أكثر تعقيدًا مما يبدو، ولكن لا يمكننا تبيُّن هذا التعقيد من خلال الفحص الذاتي، بأن «نفكر» في كيفية رؤيتنا للأشياء وفيما نراه منها، ولا يمكن لفيلسوف يتفكر في هذا الأمر منطقيًّا أن يتنبأ بكنهه. إن عقولنا الواعية لا يمكنها التوصل إلى الآليات العصبية التي يقوم عليها الإبصار. ولقد تمكَّن السابقون بالكاد من إدراك المدى الذي تنقسم عنده المعلومات إلى أجزائها ومكوناتها، إلى أن أُجْرِيَتْ دراسات رائدة على يد عالمين، هما ديفيد هابل وتورستن ويزل — في جامعة هارفرد — بدءًا من عقد الخمسينيات إلى ما بعدها، وقد حصلا عن أبحاثهما تلك على جائزة نوبل في عام ١٩٨١ (بالاشتراك مع روجر سبيري). أدخل هابل وويزل أقطابًا كهربية دقيقة في مخاخ القطط بعد تخديرها. وأثبت العالمان حدوث تنشيط لمجموعات مختلفة من الخلايا العصبية من قبل الأوجه المختلفة للمشهد البصري. إننا نعرف الآن أن كل صورة نراها يتم تجزُّؤها إلى نحو ثلاثين قناة أو أكثر؛ ومن ثم فإن بعض الخلايا العصبية تنشط فقط حينما تتلقى صورة لحافة جسم ما تتحرك في اتجاه معيَّن، في خط قطري أو أفقي أو رأسي، على سبيل المثال، وتنشط خلايا أخرى كاستجابة لتلقِّي صفة التباين المرتفع أو المنخفض، أو عمق المشهد، أو لون معين أو الحركة في اتجاه معين … وهكذا. كما يتم تحديد الموقع المكاني لكل صورة منها بالنسبة للمجال البصري، حتى إن موقع خط أفقي داكن في الركن العلوي الأيسر للمجال البصري يحفز مجموعات عدة من الخلايا العصبية كي تنشط، بينما يُنبِّه خطٌّ مماثلٌ في الركن السفلي الأيمن مجموعةً مختلفةً من الخلايا العصبية.

وفي كل خطوة تضع المناطق البصرية في المخ خريطة طوبوغرافية للعالم. ولكن لا يصير لهذه الخريطة أي معنى إلا لاحقًا. وهو نفس نوع المعنى الذي حيَّرَ «دكتور بي» المسكين الذي ذكرناه من قبل. ولكي تبلغ معنى ما، مثل اكتشاف حيوان مفترس كالنمر وتمييزه، تحتاج المعلومات البصرية لأن تترابط معًا في مراحل عدة؛ إذ يتم ربط الخطوط والألوان معًا في شكل أشرطة، وتحديد ملامح جسد النمر الرابض وفي النهاية يتم بناءً على الخبرة السابقة التعرف الكامل على النمر القابع خلف الشجيرات. ولا تحصل سوى

المراحل الأخيرة من هذه العملية على التمثيل الواعي بالمخ؛ فالغالبية العظمى مما يحدث من معالجات بصرية لا يرى نور العقل مطلقًا.

كيف يتم ربط كل هذه القطع المقسمة من المشهد معًا مجددًا للحصول على إبصار مترابط؟ يبقى هذا السؤال واحدًا من أكثر موضوعات علم الأعصاب إثارة للاهتمام، ولم تتم الإجابة عنه بشكل يرضي الجميع حتى الآن. ولكن لِنُجِيبَ عنه بصفة عامة نقول إن الخلايا العصبية تنشط بشكل متزامن؛ فالخلايا العصبية التي تنشط (أي تطلق نبضاتها) معًا تترابط معًا. والتوقيت الدقيق أمر جوهري. في أواخر ثمانينيات القرن العشرين اكتشف وولف سنجر وزملاؤه في معهد ماكس بلانك لأبحاث المخ في فرانكفورت بألمانيا لأول مرة نمطًا جديدًا من الموجات المخية، يمكن التقاطه بجهاز تخطيط كهربية الدماغ، يُعرَف الآن باسم «ذبذبات جاما».[٥] ووجدوا أن المجموعات الكبيرة من الخلايا العصبية تصير متزامنة في نمط مشترك، فتطلق نبضاتها مرة كل ٢٥ ملي ثانية تقريبًا، أي حوالي ٤٠ مرة في الثانية أو ٤٠ هرتز في المتوسط. (في الواقع، يتراوح المدى من حوالي ٣٠ إلى ٧٠ هرتز، وهو أمر مهم سنعود إليه فيما بعد.)

هذه الأنماط المتزامنة لإطلاق الشحنات والنبضات هي بالضبط ما كان فرانسيس كريك يبحث عنه. فبعد إنجازات كريك المشهورة في حل شفرة الدي إن إيه تحوَّل بعقله الفذِّ لحل مسألة الوعي؛ فعمل مع كريستوف كوخ للبحث عن نوع معين من نمط إطلاق النبضات الذي يمكن أن تصير له علاقة بالوعي ذاته، وقد أطلق عليه «العلاقات العصبية للوعي».

كان كريك وكوخ يدركان بشدة أن الكثير مما يجري في عملية المعالجة البصرية يبقى خارج نطاق الوعي. وهذا يجعل مسألة الوعي أكثر غرابة. فكل المدخلات الحسية إلى المخ تأتي عن طريق خلايا عصبية تطلق نبضاتها، إلا أن بعض أنماط نبضات الخلايا العصبية يستقبلها المرء بشكل واعٍ؛ ومن ثمَّ نصير مدركين للونٍ ما أو وجهٍ ما، بينما لا ينطبق هذا على الأنماط الأخرى (وهذا يشمل جميع صور المعالجة البصرية اللاواعية للخطوط والتباين والمسافات ... إلخ). فما الفارق إذن؟

يرى كريك وكوخ أنه لا سبيل إلى معرفة الفارق ما دمنا لا نعرف حتى أي أنماط الخلايا العصبية ينتج عن نشاطها استقبال واعٍ وأيها ليس كذلك. وكان ما أرادا التوصل إليه هو مجموعة من الخلايا العصبية التي تبدأ في إطلاق نبضاتها في نفس اللحظة التي يصير عندها الشخص واعيًا بشيء ما (كرؤية كلب على سبيل المثال). وينقطع هذا

النشاط بمجرد أن يتحوَّل انتباه الشخص إلى شيء آخر. وقد افترض كريك وكوخ أنه لا بد أن هناك شيئًا ما مختلفًا فيما يتعلَّق بإطلاق الخلايا العصبية لنبضاتها، الذي يؤدي بالفعل إلى الإدراكات الواعية. ولقد صارت محاولة التوصل إلى العلاقات العصبية للوعي من الأمور ذات الأهمية الكبيرة لدى علماء الأعصاب. وقد أثارت ذبذبات الـ ٤٠ هرتز مخيلتهم؛ لأنها قدَّمَتْ — ولا تزال تُقَدِّم — حلًّا فكريًّا منطقيًّا؛ فالخلايا العصبية التي تطلق نبضاتها معًا تترابط عَبْرَ التلافيف الكبرى للمخ في أي لحظة. يتم اختزال جميع الدوائر الكهربية المتوازية إلى مخرج متسلسل بفعل الزمن نفسه. ومن ثمَّ يتفاوت الوعي من لحظة لأخرى مثل الآلات الموسيقية في الأوركسترا؛ إذ ترتبط الجُمَل اللحنية المتشعبة معًا في تناغم في كل لحظة. وكما قال الكاتب تي إس إليوت: إنك أنت الموسيقيُّ حتى تتوقَّف الموسيقى.

إن هذه الفكرة مُغْرِية، ولكنها سرعان ما تزداد تعقيدًا حينما تفكر فيها. والمشكلة الأساسية هي أن الارتباط لا بد أن يحدث في مستويات متعددة، وليس ضمن الجهاز البصري فحسب. ويبدو أن الأوجه الأخرى للعقل تعمل بنفس الطريقة بدرجة كبيرة، منها الذاكرة على سبيل المثال. يذكر إخصائي الكيمياء العصبية ستيفن روز في كتابه «صنع الذاكرة» كم كان يشعر بالحيرة من الطريقة التي تتبدد بها الذكريات مثل الدخان من المخ؛ فلا يبدو أن تلك الذكريات «مستقرة» في مكان واحد بعينه. وقد اكتشف فيما بعد أن السبب هو أنها تتفتَّت إلى مكوناتها وأجزائها بطريقة تماثل بدرجة كبيرة ما يحدث للإبصار. فاكتشف روز، على سبيل المثال، أن الأفراخ حديثة الفقس التي تلتقط حبات ذات نكهات معينة سرعان ما تتعلم أن تتجنَّب الحبات ذات الطعم اللاذع التي تتسم بلون معين، ولكن ذاكرتها تختزن على نحو مجزَّأ: فاللون له مكان، والشكل له مكان آخر، والحجم أو الرائحة أو الطعم اللاذع لها أماكن أخرى مختلفة ... وهكذا. ويتطلب تكوين ذاكرة متلاحمة إعادة ربط كل هذه العناصر معًا، بما يشبه عملية إعادة عرض. ويُظهر بحث حديث بجلاء أن إعادة ربط مكونات الذاكرة تعتمد على إطلاق نبضات من نفس طاقم الخلايا العصبية التي استجابت للخبرة الأولى سابقًا.

ويذهب عالم الأعصاب أنطونيو داماسيو إلى أبعد من هذا؛ إذ يدخل «الذات» ضمن المزيد من الخرائط العصبية. وهو يُميِّز بدقة بين العواطف والمشاعر (البعض يرى أنه مفرط الدقة في تمييزه هذا)؛ إذ يقول داماسيو إن العاطفة (أو الانفعال) تُعتَبَر، بدرجة كبيرة، خبرة جسمانية بدنية. إذ تتقلص الأمعاء بفعل الخوف، وتتسارع دقات القلب،

وتتعرق اليدان، وتتسع العينان، وتتسع حدقتا العينين، ويلتوي الفم ... إلخ. وهذا سلوك لاإرادي، يتجاوز حدود سيطرتنا إلى حد بعيد، بل ويتجاوز قدرتنا على التخيُّل، على الأقل بالنسبة للذين يعيشون أسلوب حياة مدنية وادعة. وبالنسبة لي شخصيًّا، فعلى مدار جميع سنوات حياتي، لم يحدث لي سوى مرتين أو ثلاث مرات أن سيطر عليَّ شعور «حيواني» حقيقي بالرعب، وأقصد بهذا الاستجابة الانفعالية التي قبضت أمعائي وسبَّبَتْ لي بشدتها صدمة في داخلي. فلقد شممت رائحة خوفي مرة واحدة فقط لن أنساها، وسبَّبَتْ لي اضطرابًا وارتباكًا. ويقول داماسيو إن جميع الانفعالات، حتى الأكثر تدرجًا منها تكون بدنية؛ موضعها الجسم. ولكن الجسم ليس بمعزل عن العقل؛ فهذا مرتبط بذاك. وكل هذه الحالات الجسمانية تتصل بالمخ عن طريق الأعصاب والهرمونات، وتُرسَم في المخ خريطة للتغيُّر في الحالة الجسمانية، جزءًا جزءًا، وعضوًا عضوًا، وجهازًا جهازًا. ويحدث أغلب هذا الرسم في الأجزاء الأكثر قِدَمًا في المخ، بما فيها جذع المخ والدماغ الأوسط اللذان تقع فيهما المراكز الحيوية الخطيرة في مخاخ جميع الفقاريات. وهذه الخرائط العقلية تكوِّن المشاعر والأحاسيس، التي تُعتبَر الانطباعات التصويرية العصبية للانفعالات الجسمانية. وأما عن كيف تؤدي تلك الانطباعات العصبية (وهي بالأساس معلومات) إلى إحساس شخصي بشعور ما، فهي نقطة نقاش سنعود إليها قريبًا.

ولكن حتى المشاعر ليست كافية لداماسيو؛ إذ يقول إننا لا نكون واعين إلى أن نبدأ في الشعور بمشاعرنا، حتى نعرف ماهية الشعور. وهذا يعني المزيد من الخرائط في المخ بالطبع. ومن ثم تُعتبَر الخرائط العصبية الأولية تضع تخطيطات لكافة جوانب أجهزتنا الجسمانية، وتشمل النشاط العضلي، وحموضة المعدة، وسكريات الدم، وسرعة التنفس، وحركات العينين، والنبض، وامتلاء المثانة ... إلخ. ويحدث هذا التخطيط ويتكرر سريعًا لحظة بلحظة. ويرى داماسيو إحساسنا بذاتنا باعتباره ناشئًا عن جميع هذه التقارير الجسمانية، بادئًا في صورة ذات أولية لا واعية، وبالأساس في شكل عملية قراءة قوية للحالة الجسمانية. وينبع الوعي الحقيقي للذات من الطريقة التي يتم بمقتضاها تعديل هذه الخرائط فيما يتعلق بأجسام أو أشياء مادية تُوجَد في العالم الخارجي، أشياء مثل ابنك أو امرأة معينة، أو جَرف يثير الدوار، أو رائحة القهوة، أو مفتش التذاكر ... إلخ. كل هذه الأشياء المحسوسة يتم استقبالها مباشرةً من قبل الحواس، ولكنها تولِّد أيضًا استجابة انفعالية في الجسم، وهذه تلتقطها خرائط الجسم العصبية في المخ لتوليد شعور ما. وهكذا، فإن الوعي هو معرفة كيف تعدل الأشياء الموجودة في العالم الذات؛

أي بتكوين خريطة لكل هذه الخرائط، وكيف تتغيَّر، أي بتكوين خريطة من رتبة ثانية. إنها خريطة تُبيِّن كيف تكون علاقة هذه المشاعر بالعالم، خريطة تكسب إدراكاتنا قيمًا ومعاني.

كيف يتم صنع كل هذه الخرائط؟ وكيف يرتبط بعضها ببعض؟ تأتي أكثر الإجابات عن هذا السؤال إقناعًا من عالم الأعصاب جيرالد إديلمان، الذي — بعد أن فاز بجائزة نوبل عن مساهماته في علم المناعة في عام ١٩٧٢ — كرَّسَ العقود التالية لدراسة الوعي. وتَنْهَل أفكارُه من نفس المعين الذي يَنْهَل منه بَحْثُه في علم المناعة؛ وهو قوة الانتقاء داخل الجسم. ففي حالة علم المناعة، ساعد إديلمان على إظهار كيف يمكن تنشيط جسم مضاد واحد بشكل انتقائي بعد تلامسه بنوع بكتيريا ما؛ إذ يؤدِّي الانتقاء إلى تكاثر الخلايا المناعية المنتصرة على حساب الأخريات. وبعد مرور نصف عمر الخلايا المناعية، تعتمد تخصصية تلك الخلايا في مجرى دمك بدرجة كبيرة على خبراتك، وليس على جيناتك مباشرةً. ويقول إديلمان إن هناك نمطًا مشابهًا من الانتقاء يعمل في المخ باستمرار. ففي هذه الحالة يتم انتقاء مجموعات من الخلايا العصبية وتقويتها من خلال الاستعمال، بينما تذوي مجموعات أخرى من جراء عدم الاستعمال. وهنا أيضًا تسود المجموعات الفائزة، كما تتحدد العلاقات بين الخلايا العصبية بالخبرة المتراكمة، ولا تتحدد بالجينات مباشرةً.

يحدث الأمر بهذه الكيفية. فأثناء التطور الجنيني داخل الرحم يتم تزويد المخ بالوصلات (أي الألياف العصبية) على صورة كتلة غير متشعبة، مع وجود حزم من الألياف العصبية تربط بين المناطق المختلفة في المخ (فتربط بين العصب البصري والمراكز البصرية في المخ، ويتكوَّن الجسم الجاسئ الذي يربط بين النصفين الكرويين للمخ … إلخ) ولكن لا يحدث تقريبًا أي تخصص أو إدراك للمعنى. باختصار، تعمل الجينات على تخصيص الدوائر العصبية العامة بالمخ، بينما تعمل الخبرة على تخصيص الألياف العصبية بالتحديد وجميع التفاصيل المتفردة الخاصة التي تلزمها. ويأتي المعنى غالبًا مع الخبرة، التي تكتب مباشرةً في المخ. وكما يقول إديلمان فإن «الخلايا العصبية التي تطلق نبضاتها معًا تترابط أليافها معًا.»[٦] بمعنى أن الخلايا العصبية التي تطلق نبضاتها في نفس الوقت تقوِّي وصلاتها (التي تُسمَّى التشابكات العصبية) وتكوِّن المزيد من الوصلات التي تربط ماديًّا بين الألياف العصبية. وهذه الوصلات تتكوَّن موضعيًّا

ضمن مجموعات من الخلايا العصبية (إذ تساعد على ربط الأوجه المختلفة من المعلومات البصرية معًا على سبيل المثال)، ولكنها أيضًا تربط — عَبْرَ مسافات بعيدة — بين المراكز البصرية والمراكز العاطفية أو الكلامية. في نفس الوقت تضعف وصلات تشابكية أخرى شيئًا فشيئًا، أو تختفي تمامًا؛ إذ لا تُوجَد بين خلاياها العصبية أمور مشتركة إلا القليل. وبعد الولادة بقليل، ومع تسارع وتيرة تدفُّق الخبرات وتجمُّعها يجري تشكيل المخ من الداخل، فتموت مليارات من الخلايا العصبية؛ بنسب تتراوح من ٢٠ بالمائة إلى ٥٠ بالمائة من جميع تلك الخلايا، وتُفقَد في غضون الشهور الأولى من حياة الطفل الوليد، كما تُفقَد عشرات المليارات من الوصلات التشابكية الضعيفة. وفي نفس الوقت تتم تقوية وتدعيم عشرات التريليونات من التشابكات العصبية؛ مما يؤدي إلى تكوين ما يصل إلى ١٠ آلاف تشابك عصبي لكل خلية عصبية في بعض مناطق القشرة المخية. وهذه المرونة التشابكية تكون أكبر ما يمكن في السنوات المبكرة التي يتشكَّل فيها الجسم (والجهاز العصبي على الأخص)، ولكنها تستمر طوال حياة الإنسان. قال الكاتب الفرنسي مونتين يومًا إن كل إنسان تعدَّى سن الأربعين يكون مسئولًا عن وجهه. وكذلك نحن بلا شك مسئولون عن مخاخنا.

قد تتساءل عن الكيفية التي تسهم بها الجينات الوراثية في هذه العملية بالضبط. تفعل الجينات هذا عن طريق تخصيص البنية العصبية العامة، وأيضًا تحديد الحجم والتطور النسبيين لمناطق المخ المختلفة. وهي تؤثِّر في احتمالية بقاء الخلايا العصبية حية، وقوة وصلاتها التشابكية، والنسبة بين الخلايا العصبية التنبيهية والتثبيطية، والتوازن الكلي للنواقل العصبية المحددة … إلخ. وتسهم هذه التأثيرات في تحديد شخصيات البشر وكذلك قابليتهم لأن يصيروا مدمنين للرياضات الخطرة أو للمخدرات، أو عرضة للإصابة بالاكتئاب الشديد، أو يُفضِّلون التفكير المنطقي. وبهذه الطريقة تؤثِّر الجينات في مواهب البشر وخبراتهم أيضًا. إلا أن الجينات لا تحدِّد تخصصية البنية التركيبية العصبية للمخ بالتفصيل. فكيف هذا؟ للإجابة نقول إنه لا سبيل أمام ٣٠ ألف جين فقط لأن تحدِّد مصير التشابكات العصبية في القشرة المخية والتي يبلغ عددها، كما يزعم كوخ، ٢٤٠ تريليونًا (علمًا بأن التريليون يساوي ألف مليار). ولو حدث هذا لكان الجين الواحد مسئولًا عن ٨ مليارات من التشابكات العصبية.

يشير إديلمان إلى عملية تطور المخ باسم «الداروينية العصبية»، وهو ما يركز على فكرة أن الخبرة تنتقي المجموعات العصبية الناجحة. كل القواعد الأساسية للانتقاء

الطبيعي موجودة؛ إذ نبدأ بعدد هائل من الخلايا العصبية، وتلك يمكن أن تتشابك بملايين الطرق المختلفة لتحقيق نفس النتائج. وتتفاوت الخلايا العصبية فيما بينها ويمكن إما أن تنمو وتقوى وإما أن تنتهي وتذوي. ويحدث تنافس بين الخلايا العصبية لتكوين وصلات تشابكية والبقاء التفاضلي على أساس النجاح؛ إذ تكوِّن «أنسب» مجموعات الخلايا العصبية وأنفعها أكثر الوصلات التشابكية. وقد اشتهر عن فرانسيس كريك أنه قال متندرًا إنه يفضل أن يسمي العملية كلها «الإديلمانية العصبية»؛ إذ إن التوازي بين الانتقاء الطبيعي وتطور المخ مصطنع بعض الشيء. إلا أن علماء الأعصاب صاروا اليوم متقبلين للفكرة الأساسية على نطاق واسع.

ولقد قدَّمَ إديلمان مساهمة ثانية مهمة في الأساس العصبي للوعي؛ وهي فكرة الدوائر العصبية المترددة، أو ما أسماها إديلمان «الإشارات المتوازية الراجعة من جديد» (وهي تسمية غير موفَّقة إلى حدٍّ ما). يقصد إديلمان بهذه التسمية أن الخلايا العصبية التي تطلق نبضاتها في منطقة ما ترتبط بخلايا عصبية أخرى في مناطق بعيدة، وهذه ترد النبضات من خلال وصلات أخرى لتكون دائرة عصبية عابرة متناغمة، وبعدها تقوم المدخلات الحسية المتنافسة بتبديد تجميعة الخلايا العصبية وتستبدل بها واحدة أخرى سريعة الزوال، تعاود العملية في انسجام. هنا تنسجم أفكار إديلمان بجلاء مع أفكار كريك وكوخ وكذلك وولف سنجر (وإن كان من الواجب القول إن المرء يجب أن يقرأ ما بين السطور لكي يتوصل إلى أوجه التشارك بينهم، فنادرًا ما وجدت مجالًا يعمد فيه رواده إلى عدم ذكر بعضهم بعضًا للإحالة والمراجعة مثل هذا المجال، بل ويندر حتى أن يُقْدِم البعض منهم على شجب الأفكار غير الموفقة لخصومهم أو انتقادها).

يعمل الوعي على نطاق يتراوح من عشرات إلى مئات من الملي ثانية.[٧] فإذا عُرِضَتْ صورتان أمام الإنسان لحظيًّا، بينهما زمن مقداره ٤٠ ملي ثانية، فلن يدرك على نحوٍ واعٍ إلا الصورة الثانية فقط، ولن يرى الصورة الأولى. إلا أن استخدام التنبيه بالأقطاب الدقيقة ووسائل المسح التصويري للمخ (مثل الرنين المغناطيسي الوظيفي) يظهر أن المراكز البصرية في المخ تلتقط الصورة الأولى بالفعل، لكنها لا تعيها مطلقًا. ولكي يحدث الوعي، يبدو على الأرجح أنه يجب على أي مجموعة عصبية أن يتذبذب أفرادها معًا لعشرات وربما مئات من الملي ثانية؛ وهو ما يعود بنا مجددًا إلى ما ذكره سنجر عن ذبذبات الـ ٤٠ هرتز. ولقد أظهر كلٌّ من سنجر وإديلمان أن المناطق البعيدة بالمخ تتذبذب بالفعل في تزامن بهذه الكيفية؛ فهي تكوِّن دائرة مغلقة معًا وهو ما يُسمَّى

«الانغلاق المرحلي». تنغلق مجموعات أخرى من الخلايا العصبية معًا في أطوار ومراحل مختلفة، بمعدلات أسرع أو أبطأ قليلًا. ومبدئيًّا نقول إن هذا الغلق المرحلي يمكننا من التفرقة بين الأوجه المختلفة من نفس المشهد الذي نراه. ومن ثم فإن جميع عناصر سيارة خضراء تنغلق مرحليًّا معًا، بينما تنغلق جميع عناصر سيارة زرقاء قريبة منها مرحليًّا بشكل مختلف قليلًا، بما يضمن ألا تختلط وتتشوش صورتا السيارتين في الذهن. فكل وجه من أوجه المشهد البصري يحدث له انغلاق مرحلي بشكل مختلف قليلًا.

كان لسنجر فكرة رائعة تُفسِّر كيف ترتبط كل هذه الذبذبات المنغلقة مرحليًّا معًا عند مستوى أعلى؛ عند مستوى الوعي ذاته، وبتعبير آخر: الكيفية التي ترتبط بها هذه الذبذبات بالمدخلات الحسية الأخرى (كالسمع، والشم، والذوق ... إلخ) وبالشعور والذاكرة واللغة؛ لإنتاج إحساس تكاملي بالوعي. وهو يُسمِّي هذا «التصافح العصبي» الذي يسمح بحدوث «التسكين» الطبقي للمعلومات، بحيث تجد المعلومات الأصغر حجمًا أو الأقل قَدْرًا مكانها ضمن الصورة الأكبر. والطبقة العليا فقط، التي تُعتَبَر أشبه بالملخَّص التنفيذي لجميع المعلومات غير الواعية، هي التي يتم إدراكها على نحوٍ واعٍ.

ويعتمد التصافح العصبي على حقيقة بسيطة؛ فحينما تطلق الخلية العصبية نبضاتها يحدث لها إزالة للاستقطاب، فلا يمكنها أن تطلق نبضاتها مجددًا إلا من بعد أن يُعاد استقطابها. وهذا يستغرق بعض الوقت. وهذا يعني أنه إذا وصلت إشارة عصبية أخرى أثناء فترة الراحة التي تستعيد فيها الخلية العصبية استقطابها فسيتم تجاهلها. ضَعْ في اعتبارك أنه إذا كانت خلية عصبية ما تطلق نبضاتها بمعدل ٦٠ مرة في الثانية (أي ٦٠ هرتز) فإنها تتقيَّد باستقبال إشارات آتية فقط من خلايا عصبية تطلق نبضات في تزامن مرحلي. ومن ثم، على سبيل المثال، إذا حدث أن كانت مجموعة ثانية من الخلايا العصبية تطلق نبضاتها بمعدل ٧٠ مرة في الثانية (أي ٧٠ هرتز) فستخرج عن نطاق التزامن مع المجموعة الأولى في أغلب الوقت. وبهذا تصير المجموعتان مستقلتين ولا تستطيعان التصافح. من ناحية أخرى، إذا كانت مجموعة ثالثة من الخلايا العصبية تطلق نبضاتها ببطء أكثر، بمعدل ٤٠ هرتز مثلًا، فستكون هناك فترة أطول كثيرًا حتى تتمكَّن هذه الخلايا من استعادة استقطابها وتكون جاهزة للإطلاق مجددًا؛ أي إنها تكون ببساطة في انتظار المنبه الصحيح. وتلك الخلايا يمكنها الاستجابة للخلايا الأخرى التي تتذبذب بمعدل ٧٠ هرتز. وبتعبير آخر نقول: كلما كان التذبذب أبطأ؛ كان تراكُب المراحل أكبر ويكون احتمال التصافح مع مجموعات أخرى من الخلايا العصبية أفضل.

وهكذا نجد أن أسرع الذبذبات تربط معًا الأوجه المنفصلة من المشهد البصري، والروائح، والذاكرة، والعواطف ... إلخ. وكلٌّ منها كوحدات مستقلة، بينما تربط الذبذبات الأبطأ معًا جميع المعلومات الحسية والجسمانية في كلٍّ موحَّد (وهي خريطة الرتبة الثانية لداماسيو)، وتُعتبَر هذه لحظة في تدفُّق الوعي.

لم يثبت من هذا بما لا يَدَع مجالًا للشك إلا القليل، ولكن هناك الكثير من الأدلة التي تتناغم على الأقل مع هذه الصورة. والأهم من هذا أن هذه الأفكار تصنع تنبؤات يمكن اختبارها، مثل فكرة أن ذبذبات الـ ٤٠ هرتز ضرورية لربط محتويات الوعي، وعلى العكس من هذا، فإن فقدان هذه الذبذبات يعادل فقدان الوعي. وإذا وضعنا في الاعتبار صعوبة إجراء هذه القياسات (التي تتطلب قياس معدلات إطلاق النبضات من آلاف من أفراد الخلايا العصبية عَبْرَ المخ في وقت واحد) فقد تمر سنوات قبل أن يتم إثبات هذه الفرضيات أو غيرها.

وحتى في هذه الحالة تساعد هذه المفاهيم، بوصفها إطارًا تفسيريًّا، على جعل الوعي مفهومًا. فهي تظهر على سبيل المثال كيف يمكن أن ينشأ الوعي الممتد من الوعي الأولي؛ إذ يعمل الوعي الأولي في الزمن الحاضر، معيدًا بناء نفسه لحظة بلحظة، واضعًا تصورًا لكيفية تعديل النفس بالاستعانة بأشياء خارجية، وكاسيًا الإدراكات بثوب من المشاعر والأحاسيس. يستخدم الوعي الممتد الآليات عينها، ولكنه يربط الذكريات واللغة بكل لحظة من الوعي الأساسي، مطابقًا بين المعنى العاطفي والماضي الذاتي الشخصي، وواصفًا المشاعر والأشياء بالكلمات ... إلخ. ومن ثم، ينبني الوعي الممتد على أساس المعنى العاطفي، مدمجًا الذاكرة واللغة والماضي والمستقبل في منظومة الزمان والمكان الحاضرين للوعي الأساسي. وتسمح آليات التصافح العصبي ذاتها لامتدادات شاسعة من الدوائر المتوازية بأن ترتبط من أجل تكوين لحظة واحدة من الوعي.

أَجِدُ كلَّ هذا قابلًا للتصديق. ولكن يبقى أعمق التساؤلات بدون إجابة؛ وهو: كيف تولِّد الخلايا العصبية الشعور في المقام الأول؟ فإذا كان الوعي هو القدرة على الشعور بشعور ما، وتوليد معنى عاطفي دقيق كتعليق مستمر على الذات في هذا العالم، فإن الصرح بأكمله يرتكز على الشعور؛ وهو ما يُسمِّيه الفلاسفة مشكلة الخبرات الواعية الذاتية. وقد حان الوقت لمواجهة المعضلة مواجهة مباشرة.

إن الألم يوجع لحكمة وسبب. وقليل من الناس هم الذين يُولَدون محرومين خلقيًّا من نعمة الإحساس بالألم. وهم يعانون أضرارًا فظيعة، وغالبًا ما تكون غير متوقعة. من

هؤلاء طفلة تُدعَى جابي جنجراس. حين كان عمرها أربع سنوات، كانت جابي موضوع فيلم وثائقي أخرجته ميلودي جلبرت عام ٢٠٠٥. لم تكن جابي تحس بالألم؛ مما جعل كل مراحل نموها وتطورها محنة وبلاءً من الإصابات والأمراض. فحينما بدأت تنبت أسنان لبنية لدى جابي قضمت أصابعها حتى وصلت للعظام، وشوَّهَتْها ببشاعة أجبرت والدتها على الذهاب لطبيب الأسنان ليخلع لها أسنانها. وحينما تعلمت جابي المشي تسببت في إصابة نفسها المرة تلو الأخرى، وفي إحدى المرات كسرت فكها دون أن تدري إلى أن أُصِيبَتْ بعدوى والتهاب سبَّبَ لها حالة من الحمى. والأسوأ من هذا أنها قد تنخس نفسها في عينها فتسبب إصابة تتطلب الخياطة بالغرز، التي سرعان ما تمزقها بيديها دون أن تحس شيئًا. جرب والداها معها استخدام القيود، ثم نظارة واقية، ولكن دون جدوى. وحينما وصلت إلى سن الرابعة، خضعت لعملية استئصال للعين اليسرى؛ ثم تعرَّضَتْ عينها اليمنى أيضًا لتلف خطير؛ فصارَتْ عمياء من الناحية القانونية (درجة إبصارها ٢٠ / ٢٠٠). وفي وقت كتابتي لهذه السطور تبلغ جابي من العمر سبعة أعوام، وقد بدأت تتأقلم نسبيًّا مع حالتها الصعبة. كثيرون ممن في مثل حالتها ماتوا في طفولتهم، وقليلون هم من بقوا أحياء حتى سن البلوغ، ولكنهم غالبًا ما يُضطَرون للتعرض لإصابات بالغة. ولقد أنشأ والدا جابي مؤسسة أسمياها «منحة الألم»، وهي تدعم الأشخاص الذين يعانون نفس الحالة (انضم إليها تسعة وثلاثون عضوًا حتى الآن). واسمها على مسمى؛ فالألم نعمة بلا ريب.

ليس الألم هو الإحساس الوحيد؛ فهناك الجوع والعطش والخوف والشهوة، وكلها تندرج فيما أسماه ديريك دنتون «العواطف الأولية»، التي يصفها باعتبارها أحاسيس مُلِحَّة تسيطر على التيار الكلي للوعي، مجبرة النيات على العمل. ومن الواضح أنها جميعًا مطوعة لتحقيق بقاء الكائن الحي، أو تكاثره؛ فالشعور يدفع إلى الفعل، والفعل بدوره ينقذ الحياة أو يحفظ النوع. ولعل البشر هم الوحيدون الذين يمارسون الجنس بوعي بنية التكاثر، ولكن حتى الكنيسة لم تنجح إلا قليلًا في أن تزيل من النفوس فكرة أن الإشباع الجنسي هو الغاية من الاتصال الجنسي. فالحيوانات، ومعظم البشر، يمارسون الجنس التماسًا للإشباع الجنسي وليس لمجرد إنجاب الصغار. والفكرة هنا هي أن جميع هذه العواطف الأولية هي «مشاعر»، وكلها تخدم غرضًا بيولوجيًّا، حتى إذا لم يتم تقدير هذا الغرض أو إدراكه في كل الأحوال. والألم، فوق غيره من المشاعر كلها، شعور غير سار. ولكن لولا عنصر الوجع المزعج للألم لآذينا أنفسنا بشدة وفظاعة؛ فالشعور بالألم

بغير خاصيته المزعجة يكون بلا فائدة. والأمر نفسه ينطبق على الشهوة؛ فالجماع الآلي بغير مشاعر لا يُعَدُّ مكافأة في حد ذاته؛ فنحن، وسائر الحيوانات الأخرى نلتمس اللذة الحسية، والشعور بها. أيضًا مجرد أن يعطي الجهاز العصبي إشارة بوجود العطش إذا هام المرء على وجهه في الصحراء ليس كافيًا، بل إنها تلك العاطفة العارمة التي «تجفف» العقل من الداخل والتي تساعد على بقائنا أحياء، وتجبرنا على اللجوء إلى إحدى الواحات، وتعتصر آخر قطرة من قوة تحملنا.

إن الفكرة القائلة إن تلك العواطف الأولية نشأت بفعل الانتقاء الطبيعي يتعذَّر إخضاعها للاختبار. ولكن لها دلالات جوهرية، وأول من أشار إليها هو الأب المؤسس لعلم النفس الحديث والعبقري الأمريكي ويليام جيمس في أواخر العصر الفيكتوري. فقد افترض جيمس أن المشاعر، وما يستتبع ذلك من الوعي ذاته، لها منفعة بيولوجية. وهذا بدوره يعني أن الوعي ليس ظاهرة ثانوية تصاحب الكائن الحي كظلِّه ولا تستطيع إحداث أي آثار مادية خاصة بها. فالمشاعر تُحدث بالفعل آثارًا مادية. وإذا كان الأمر كذلك فإن تلك المشاعر هي — بمعنى ما — مادية. وقد استنتج جيمس أن المشاعر بالرغم من مظهرها اللامادي، فإن لها بالفعل خصائص مادية، ونشأت عن طريق الانتقاء الطبيعي. ولكن ما هي المشاعر بالضبط؟ لم يحدث بعد جيمس أن تفكَّرَ امرؤ في هذا التساؤل بأشد مما فعل جيمس نفسه، ولقد كان الاستنتاج الذي توصَّلَ إليه مضادًّا للبديهة ومثيرًا للإزعاج؛ إذ ذهب إلى أنه لا بد من وجود خصائص غير معروفة للمادة، أو نوع ما من «الغبار الذهني» الذي يتخلل الكون. ومع أن جيمس يُعتبَر البطل المبجَّل في نظر كثيرين من علماء الأعصاب المرموقين اليوم، فإنه تبنَّى شكلًا من الشمولية العقلية (قائلًا إن الوعي هو في كل مكان، وجزء من كل شيء)؛ مما جعل الذين مالوا إلى اتباعه قليلين حتى يومنا هذا.

لكي أعطيك إحساسًا بمدى صعوبة هذه المشكلة؛ فكِّر في بعضٍ من الأجهزة مثل جهاز التليفزيون أو آلة الفاكس أو الهاتف. لا حاجة بك لأن تعرف طريقة عمل أيٍّ منها كي تدرك أنها لا تكسر قوانين علم الفيزياء. فالإشارات الإلكترونية تُشفِّر مخرجاتها بشكل أو بآخر، ولكن مخرجاتها دائمًا ما تكون مادية في طبيعتها؛ فهي أنماط من الضوء في حالة التليفزيون، وموجات صوتية في حالة الهاتف أو المذياع، ومطبوعات في حالة الفاكس. وثمة شفرة إلكترونية تنتج مُخرجًا ما في وسط مادي معروف. ولكن ماذا عن المشاعر؟ في هذه الحالة تنقل الأعصاب الإشارات الإلكترونية المشفرة بنفس الطريقة

أساسًا مثل التليفزيون؛ فالخلايا العصبية تحدِّد المُخرج العصبي بدقة عن طريق شفرة ما. لا مشكلة في هذا، ولكن ما هو هذا المُخرج بالضبط؟ فكِّرْ في كل الخصائص المعروفة للمادة. فلا تبدو المشاعر مثل إشعاع كهرومغناطيسي أو موجات صوتية، ولا تضاهي أي شيء ضمن البنية المادية للذرات. إنها ليست بروتونات ولا إلكترونات، فماذا تكون بحق السماء؟ أهي أوتار متذبذبة؟ أم جرافيتونات كمية؟ أم مادة مظلمة؟[٨]

هذه هي المعضلة الصعبة التي تحدَّثَ عنها تشالمرز. ولقد ذهب تشالمرز، مثل جيمس من قبله، إلى أنه ما من سبيل لحلها إلا من خلال اكتشاف خصائص أساسية جديدة للمادة. والسبب بسيط؛ فالمشاعر مادية، إلا أن قوانين الفيزياء المعروفة، التي يُفترَض استطاعتها أن تَصِف لنا العالم على نحوٍ وافٍ، ليس بها مكان للمشاعر. وعملية الانتقاء الطبيعي — مع كل ما تتمتع به من قوة — لا تخلق شيئًا من لا شيء، بل لا بد أن تكون ثمة بذرة من «شيء ما» كي تعمل عليها؛ بذرة من شعور ما، يمكنك القول، يستطيع التطور أن يبلورها إلى ذلك العقل المهيب. هذا ما يُسمِّيه عالم الكيمياء الفيزيائية الاسكتلندي جراهام كيرنز سميث «قنبلة القبو» للفيزياء الحديثة. ويقول مفترضًا أن المشاعر إذا لم تكن تضاهي أيًّا من الخصائص المعروفة للمادة، فلا بد أن للمادة نفسها بعض الملامح الإضافية أو ما يمكن أن نُسمِّيها «ملامح شخصية»، التي إذا تمَّ تنظيمها من قبل الانتقاء الطبيعي فستنتج عنها المشاعر الداخلية التي نتمتع بها. إن المادة تتصف بالوعي بطريقة ما مع وجود خصائص «داخلية»، فضلًا عن الخصائص الخارجية التي يقيسها علماء الفيزياء. وهكذا عاد مذهب الشمولية العقلية بقوة من جديد.

إن هذا الأمر يبدو منافيًا للعقل، ولكن لا يدفعنا الغرور لأن نظن أننا نعرف كل شيء عن طبيعة المادة! فهذا غير صحيح. بل إننا لا نفهم حتى كيفية عمل ميكانيكا الكم. تَصِف نظرية الأوتار على نحوٍ رائعٍ الكيفية التي تنشأ بها كل خصائص المادة من ذبذبات لأوتار دقيقة على نحوٍ لا يمكن تخيُّله داخل أبعاد لا يمكن تخيُّلها، عددها أحد عشر بُعدًا، ولكننا لا نملك وسيلة تجريبية للتأكد من صحة أيٍّ من فرضيات هذه النظرية. ولهذا السبب ذكرت في بداية هذا الفصل أن موقف البابا لم يكن منافيًا للمنطق. فنحن لا نعرف ما يكفي عن الطبيعة المتعمقة للمادة لكي نعرف كيف تحوِّل الخلايا العصبية المادة الجامدة إلى مشاعر شخصية فيَّاضة. فإذا كانت الإلكترونات لها خصائص الموجات والجسيمات في نفس الوقت، فلماذا لا تكون الروح والمادة وجهين لنفس الشيء؟

اشتهر كيرنز سميث بأبحاثه عن أصل الحياة، ولكن بعد تقاعُدِه تحوَّلَ بعقله الرائع تجاه مشكلة الوعي. وكُتُبه عن هذا الموضوع تتسم بالتعمق والتشويق، وتَتْبَع خطوات روجر بنروز وستيوارت هامروف إلى حدائق الكم الخاصة بالعقل. وينظر كيرنز سميث إلى المشاعر باعتبارها الذبذبات المترابطة للبروتينات. وهي مترابطة مثلما تترابط حزمة من أشعة الليزر وتتماسك؛ بمعنى أن هذه الذبذبات (التي تُسمَّى الفونونات) تندمج لتكوِّن نفس الحالة الكمية. وهذه يمكن اعتبارها حالة «كمية كبيرة»، وهي كبيرة بحيث تهيمن على المسارات الكبيرة للمخ. ومرة أخرى يفترض كيرنز سميث وجود أوركسترا ما؛ حيث تندمج ذبذبات الآلات الموسيقية المفردة لتكوِّن تناغمات فائقة. إن المشاعر هي الموسيقى، ونحن الموسيقى حتى تتوقف الموسيقى. إنه تصور جميل. وليس من غير المنطقي أن تعزو التأثيرات الكمية إلى التطور. وهناك ما لا يقل عن حالتين يُحتمَل أن تكون قوى الانتقاء الصارمة قد جندت فيها آليات الكم؛ وهما: مرور الطاقة الضوئية إلى حبيبات الكلوروفيل في عملية البناء الضوئي، ومرور الإلكترونات إلى الأكسجين في عملية التنفُّس الخلوي.

إلا أنني أَجِد صعوبة في تقبُّل أن هذا ينطبق على العقل. فربما يُوجَد ما يُسمَّى العقل الكمي، ولكن ثمة مشكلات عدة، وهي معًا تبدو لي مستعصية على التذليل.

أولى تلك المشكلات وأهمها هي مشكلة لوجستية؛ إذ كيف تقفز الذبذبات الكمية عَبْرَ التشابكات العصبية؟ وكما يُصرِّح بنروز نفسه، فإن الحالة الكمية الكبيرة التي تكون منحصرة داخل الخلايا العصبية المفردة لا تحل المشكلة، وعلى المستوى الكمي يُعَدُّ التشابك العصبي بمنزلة محيط شاسع. ولكي تتذبذب الفونونات في تناغم، فلا بد أن يكون هناك تجمع تكراري من البروتينات التي تكون متقاربة المسافات فيما بينها بحيث يتذبذب كلٌّ منها في انسجام قبل أن تذوي الفونونات. يمكن معالجة هذه الأسئلة تجريبيًّا، ولكن حتى الآن لا يُوجَد أي دليل، ولا بمثقال ذرة، على وجود الحالات الكمية الكبيرة المترابطة في العقل. بل على العكس؛ فالمخ نظام ساخن، رطب، مضطرب، ويكاد يكون أسوأ مكان لتوليد حالة كمية كبيرة.

وإذا كانت تُوجَد حقًّا تلك الذبذبات الكمية المزعومة، وكانت تعتمد على وجود تجمعات تكرارية من البروتينات، إذن فماذا يحدث للوعي إذا تشتتت هذه التجمعات البروتينية بفعل الأمراض العصبية التنكسية؟ إن بنروز وهامروف يعزوان الوعي إلى وجود أنيبيبات دقيقة مجهرية داخل الخلايا العصبية، ولكن هذه الأنيبيبات تتحلَّل في

حالة مرض ألزهايمر، وينتهي بها الأمر أن تتحوَّل إلى الكتل المتشابكة التي تُعَدُّ علامة مميزة للمرض. وتُوجَد هذه الكتل المتشابكة بالآلاف في المرحلة المبكرة من مسار الحالة المرضية (وأغلبها في أجزاء المخ المسئولة عن تكوين ذكريات جديدة)، ومع ذلك يبقى الإدراك الواعي سليمًا حتى مرحلة متأخرة من المرض. وبمختصر القول، لا تُوجَد علاقات متبادلة في هذا الشأن. والكثير مما ذكرناه ينطبق على التراكيب الكمية المفترضة الأخرى. فالأغماد النخاعية، التي تُغلِّف ألياف الخلايا العصبية في المادة البيضاء للجهاز العصبي تزول وتتحلل في حالة مرض التصلب المتعدد، ومرة أخرى لا يؤثر هذا، بالكاد، على الوعي. والمثال الوحيد الذي يتفق على الأقل مع التفسير الكمي هو سلوك الخلايا الداعمة في الجهاز العصبي التي تُسمَّى الخلايا النجمية، بعد حدوث سكتة دماغية. ففي إحدى الدراسات كان عدد كبير من المرضى غير واعين لتعافيهم من السكتة الدماغية؛ فقد كان ثمة فجوة غريبة بين أدائهم الذي تم قياسه وإدراكهم لهذا الأداء، الأمر الذي قد يُفسَّر — أو لا يُفسَّر — من منظور الترابط الكمي عَبْرَ شبكة الخلايا النجمية (هذا إذا افترضنا وجود تلك الشبكة أصلًا، وهو أمر يبدو محفوفًا بالشكوك).

المسألة الثانية المتعلقة بالوعي الكمي تتمحور حول ما يستطيع هذا المفهوم أن يحله من مشاكل؟ دَعْنا نفترض أنه تُوجَد حقًّا شبكة من البروتينات المتذبذبة في المخ التي تشدو في تناغم، وأنغامها تنتج المشاعر، أو لنقل مشاعر الكينونة. ولنفترض أيضًا أن هذه الذبذبات الكمية «تشق طريقها» بشكل ما من خلال التشابكات العصبية المحيطية وتطلق «أنشودة» كمية أخرى، ناشرة الترابط عَبْرَ المخ. ما لدينا هنا هو عالم موازٍ بأكمله في المخ، وهو عالم يجب أن يعمل يدًا بيد مع العالم التقليدي المعروف من الخلايا العصبية التي تطلق نبضاتها، وإلا فكيف كان من الممكن أن يؤدي إطلاق النبضات المتزامن إلى إدراكات واعية، أو أن تؤثِّر النواقل العصبية على الحالة الواعية، وهو ما تفعله بالتأكيد؟ إن عالم الكم يحتاج لأن يُقسَّم إلى أجزاء بنفس الطريقة تمامًا مثل المخ. ومن ثم، فإن المشاعر المتعلقة بالبصر (مثل رؤية اللون الأحمر) تحتاج إلى أن تنحصر في مناطق المعالجة البصرية، في حين أن المشاعر العاطفية يمكنها أن تتذبذب فقط في مناطق مثل لوزة المخ أو الدماغ الأوسط. ثمة مشكلة في هذا الأمر هي أن البنية التحتية المجهرية في جميع الخلايا العصبية موحَّدة بالأساس — فالأنيبيبات الدقيقة في خلية عصبية ما لا تختلف بأي شكل ذي معنى عن التي في الخلايا العصبية الأخرى — فلماذا إذن وجب أن ينشد بعضها ألوانًا، والبعض الآخر آلامًا؟ وأصعب تلك الأمور فهمًا هي

حقيقة أن المشاعر تعكس أكثر الشئون الجسمانية جوهرية. وهل يمكن أن يتخيَّل المرء خاصية أساسية للمادة تعكس رنين الحب أو الموسيقى في صورة ألم بالمعدة؟ وهل هناك ذبذبة فريدة تأخذ شكل شعور تفريغ المثانة على الملأ؟ هذا غير مرجح. لكن إذا لم يكن حل هذا الأمر يتعلق بالكَمِّ، فبماذا إذن؟

أين يُفضَّل أن نبحث عن حل للمشكلة الصعبة التي نسميها معضلة الوعي؟ هناك عدد من التناقضات الظاهرية التي يمكن التعامل معها ببساطة، بما فيها ما أسماها كيرنز سميث «قنبلة قبو» الفيزياء الحديثة. هل يجب حقًّا على المشاعر أن تُمثِّل خاصية فيزيائية للمادة إذا كانت تتطور بفعل الانتقاء الطبيعي؟ ليس هذا ضروريًّا. ليس إذا كانت الخلايا العصبية تشفِّر المشاعر بطريقة دقيقة وقابلة للاسترجاع، بمعنى أن تطلق مجموعة من الخلايا العصبية نبضاتها بطريقة محددة تعطي دائمًا نفس الشعور. فحينئذٍ يؤثر الانتقاء الطبيعي ببساطة على الخصائص الفيزيائية المميزة للخلايا العصبية. وإديلمان، الحريص كعادته في انتقاء الألفاظ يفضِّل كلمة «يستتبع». فنمط الخلايا العصبية التي تطلق نبضاتها يستتبع شعورًا ما على نحوٍ حتميٍّ؛ فهذا لا ينفصل عن ذاك. وبنفس الطريقة يمكنك القول إن جينًا ما يستتبع بروتينًا ما. يؤثِّر الانتقاء الطبيعي على خصائص البروتينات وليس على تسلسلات الجينات، ولكن لأن الجينات تشفِّر البروتينات بأسلوب صارم، ولأن الجين فقط هو الذي يُورَّث فالاثنتان تعنيان الشيء نفسه. ويبدو لي بالتأكيد أن من المرجَّح كثيرًا أن العواطف الأولية، مثل الجوع والعطش، يجب أن تأتي نتيجة نمط محدد من الإطلاق العصبي لا أن تكون خاصية اهتزازية أساسية للمادة.

ثمة تناقض آخر يمكن معالجته ببساطة، بصفة جزئية على الأقل، وهو إدراك أن عقولنا غير مادية، وأن مشاعرنا تَفُوق الوصف. ففي رأي عالم رائع آخر تحوَّل بعقله تجاه الوعي بعد تقاعده، وهو الطبيب وإخصائي علم العقاقير من نيويورك خوزيه موساكيو، فإن الفكرة الأساسية هي أن العقل لا يكتشف، ولا يستطيع أن يكتشف، وجود المخ. فنحن لا ندرك وجود المخ ولا الطبيعة المادية للعقل عن طريق التفكير فيه. وإن الطرق الموضوعية (المادية) للعلم هي فقط التي ربطت العقل بآليات العمل المادية للمخ. ويمكن ضرب مَثَلٍ عن كَمْ كُنَّا مضللين في الماضي؛ فمثلًا كان قدماء المصريين عند تحنيطهم لجثث ملوكهم يحفظون القلب وأعضاء أخرى بعناية كبيرة (إذ كانوا يعتبرون القلب هو مركز العواطف والعقل) بينما كانوا يكشطون المخ من خلال الأنف بخطاف

ويغسلون تجويف الجمجمة بملعقة طويلة ويسحبون ناتج الغسل ويتخلصون منه. وهذا يُظهر أنهم لم يكونوا على يقين بوظائف المخ وفوائده، فافترضوا أنه لن يفيد في العالم الآخر. وحتى في يومنا هذا، يمكننا تبيُّن مدى عجز العقل عن اكتشاف نفسه أثناء جراحات المخ. فالمخ بالرغم من إحساسه بكَمٍّ كبير مما يحدث في العالم لا تُوجَد به مستقبلات للألم في حَدِّ ذاته؛ ومن ثم فهو غير حسَّاس للألم كليةً. ولهذا السبب يمكن إجراء جراحات المخ دون تخدير عام.

فلماذا لا يكتشف العقل آليات عمله المادية بذاته؟ من الواضح أنه من غير الملائم، بل من الخطر، أن يشغل كائنٌ ما عقلَه في التأمل والتفكر في هذا بينما يجب عليه بالفعل أن يركز كل قدرته المخية على اكتشاف خطرٍ ما، مثل نمر يختبئ بين الشجيرات، وتقرير ما سيفعله إزاء ذلك على وجه السرعة. وهذا الفحص النفسي الذاتي في اللحظات غير المناسبة ليس بالخاصية التي يمكن أن تتغاضى عنها عملية الانتقاء الطبيعي الصارمة. ومع ذلك، فإن الناتج هو أن إدراكاتنا ومشاعرنا شفافة، وأنها موجودة هكذا دون إدراك أي شيء عن أساسها العصبي الفيزيائي. ولأننا بالضرورة غير مدركين للأساس الفيزيائي لإدراكاتنا ومشاعرنا، فإن عقولنا الواعية يكون لديها إحساس قوي باللامادية والروحانية. وقد يكون هذا الاستنتاج مزعجًا لبعض الناس، ولكنه يبدو أمرًا لا مفر منه؛ إذ ينشأ إحساسنا بالروحانية من الحقيقة القائلة إن الوعي يعمل على أساس ما تحتاج لأن تَعْرِفه فحسب. فنحن معزولون عن أمخاخنا من أجل أن نبقى أحياء.

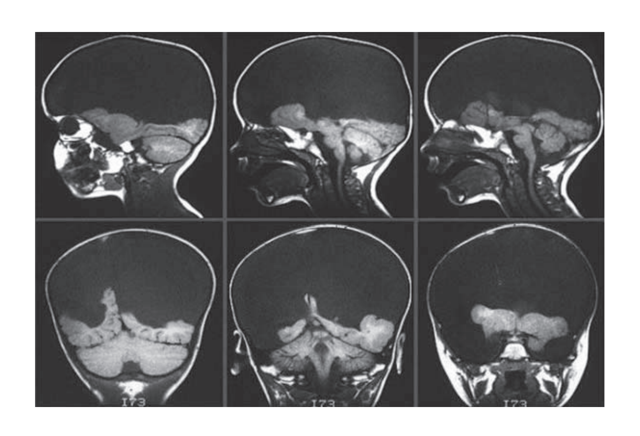
وينطبق هذا تقريبًا على سمو المشاعر عن الوصف. فكما قلتُ من قبل: إذا كانت المشاعر تتبع — كنتيجة لا بد منها — أنماطًا من الإطلاق العصبي للنبضات، بشفرة محددة جدًّا، فإن المشاعر تُعَدُّ بمنزلة لغة غير لفظية معقدة تمامًا. وللغات اللفظية جذورها العميقة في هذه اللغة غير اللفظية، ولكنها لا يمكن أن تكون نفس الشيء. فإذا كان ثمة شعور يستثيره نمط عصبي معين، فإن الكلمة التي تصف هذا الشعور يستثيرها نمط عصبي مختلف؛ فهي تُترجَم من شفرة لأخرى ومن لغة لأخرى. ولا تستطيع الكلمات أن تصف المشاعر إلا من خلال النقل والترجمة؛ مما يجعل المشاعر تَفُوق الوصف. إلا أن جميع لغات البشر تتعلَّق بمشاعر مشتركة. فاللون الأحمر مثلًا لا يُوجَد حقيقةً، ولكنه بناء عصبي لا يمكن أن يُنقَل لشخص ما لم يكن هذا الشخص قد أدرك شيئًا مماثلًا له من قبل. وبالمثل، فإن الشعور بالألم أو الجوع، أو شم رائحة القهوة ... إلخ، كلها أحاسيس ترتبط بها كلمات وتجعل التواصل اللفظي ممكنًا. وكما

أفاد موساكيو، فإن هناك نقطة تأتي دائمًا نُضطَر عندها أن نقول: «هل تعرف ما أعنيه؟» ولأننا نتشارك في نفس التراكيب والمشاعر العصبية، فإن اللغات تكون مستقرة في خبرتنا البشرية المشتركة. واللغة بدون شعور تكون مجردة من المعنى، ولكن المشاعر تكون موجودة، ويكون المعنى موجودًا بدون أي لغة لفظية، كوعي أساسي لعواطف صامتة وإدراكات بلا كلمات.

كل هذا يعني أنه مع أن المشاعر قد تتولَّد عن الخلايا العصبية، فإننا لن ندنو منها من خلال الفحص النفسي الذاتي أو المنطق — أو من خلال الفلسفة أو النظرية اللاهوتية، وإنما بالتجربة فقط. ومن الناحية الأخرى، فإن الحقيقة القائلة إن الوعي مستقر في المشاعر والدوافع والمنفرات تعني أننا يمكن أن نصل إلى جذور الوعي دون الحاجة للتواصل لفظيًّا مع الحيوانات الأخرى؛ فإننا نحتاج فقط لاختبارات تجريبية بارعة. وهذا بدوره يعني أننا يجب أن نكون قادرين على دراسة التحوُّل العصبي الحاسم، من الإطلاق العصبي إلى الشعور لدى الحيوانات، حتى البسيط منها؛ إذ تدل كل الإشارات على أن العواطف الأولية واسعة الانتشار في الفقاريات.

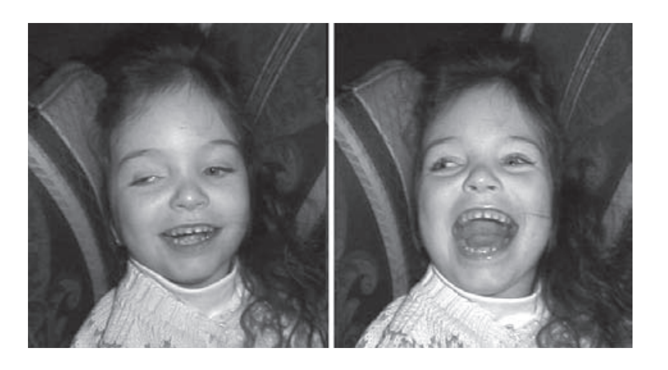
من الأمور التي توحي بقوة بأن الوعي أكثر انتشارًا مما نَمِيل لتصديقه هو بقاء بعض الأطفال على قيد الحياة وتمتعهم بوعي ظاهري بالرغم من مولدهم بدون القشرة المخية المهمة للإنسان (انظر الشكل ٩-١). إذ يمكن أن تؤدي حالة سكتة دماغية صغيرة، أو شذوذ تطوري مماثل، إلى إعادة امتصاص أجزاء كبيرة من كلتا القشرتين المخيتين أثناء الحمل. وليس من العجيب أن يُولَد أولئك الأطفال وهم يعانون إعاقات كثيرة، ومحرومون من الكلام بلغة ما ومن الإبصار الجيِّد، ولكن كما يقول عالم الأعصاب السويدي بيورن ميركر، فبالرغم من غياب كل مناطق المخ تقريبًا التي نعتبرها معنية بالوعي في الحالة الطبيعية، فإن أولئك الأطفال يكونون قادرين على السلوك العاطفي والضحك والبكاء بشكل معقول، ويُظهرون علامات على التعبير الإنساني الأصلي (انظر الشكل ٩-٢). ذكرتُ آنفًا أن الكثير من المراكز العاطفية في المخ تقع في الأجزاء الأكثر قدمًا من المخ؛ وهي جذع المخ والدماغ الأوسط، التي تتشارك فيها جميع الفقاريات تقريبًا. ولقد أظهر ديريك دنتون، من خلال المسح التصويري بالرنين المغناطيسي أن تلك المناطق القديمة تتوسط في توصيل خبرة العواطف الأولية مثل العطش والخوف من الاختناق. وربما كان الحال أن جذور الوعي لا تُوجَد في القشرة المخية العصرية مطلقًا، التي بطبيعة الحال تطور الوعي وتتوسع فيه بغزارة وتختص بالذكاء البشري الراقي،

وإنما تُوجَد في الأجزاء القديمة من المخ المنظمة بكثافة والغنية بالمراكز الحيوية، التي نتشارك فيها على نطاق واسع مع حيوانات أخرى كثيرة. وإذا كان الحال كذلك، فإن التحول العصبي من إطلاق النبضات إلى الشعور يَفْقِد بعضًا من سحره وغموضه.



شكل ٩-١: صورة مسحية بالرنين المغناطيسي لرأس طفل مصاب بحالة شديدة من الاستسقاء المخي. ويتضح منها أن القشرتين المخيتين قد اختفتا؛ وصارت الجمجمة ممتلئة بالسائل المخي الشوكي.

إلى أي درجة ينتشر الوعي؟ لن نعرف الإجابة عن هذا التساؤل على وجه التحقيق إلى أن يتم اختراع نوعٍ ما من مقياس الوعي. إلا أن العواطف الأولية — مثل: العطش، والجوع، والألم، والشهوة، والخوف من الاختناق … إلخ — كلها على ما يبدو واسعة الانتشار بين الحيوانات التي لديها مخاخ، بما فيها حتى لافقاريات بسيطة مثل النحل. فلدى النحلة أقل من مليون خلية عصبية (بينما لدى الإنسان ٢٣ مليار خلية عصبية في القشرة المخية وحدها)، إلا أنها قادرة على أداء سلوك معقد تمامًا؛ فهي لا تكتفي بإعطاء إشارات تُحدِّد اتجاه غذائها من خلال رقصاتها الاهتزازية الشهيرة، وإنما يرتقي سلوكها إلى درجة تحديد أماكن الأزهار الأكثر امتلاء بالرحيق الذي تتغذَّى عليه، حتى وإن عمد بعض الباحثين إلى تعديل التوازن الرحيقي للأزهار بهدف خِدَاع النحل. لا أزعم أن النحلة واعية بالمعنى الذي نفهم به هذا اللفظ، ولكن حتى «جهاز المكافأة»



شكل ٩-٢: أمارات السرور والسعادة تبدو على وجه طفلة في الرابعة من عمرها، تُدعَى نيكي، مصابة بالاستسقاء المخي.

العصبي البسيط الذي لديها يستحق مكافأة؛ بمعنى أنه يستحق إحساسًا جيدًا، وهو ذلك الطعم اللذيذ لرحيق الزهور. أو نقول بكلمات أخرى إن النحلة لديها بالفعل ما نعتبره وعيًا، حتى إذا لم يكن وعيًا حقيقيًّا على الأرجح.

وهكذا فإن المشاعر في النهاية هي بناء عصبي، وليست خاصية أساسية للمادة. وبالنسبة لبعض الحيوانات الأخرى المشاركة لنا في هذا العالم كالحشرات، التي يتمثل أعلى ما وصلت إليه من نشوء وارتقاء في هذا النحل، هل نجد أنفسنا مجبرين على التوصل إلى قوانين جديدة للفيزياء لتفسر سلوكياتها؟ ولكن إذا لم تكن المشاعر أكثر من محض خلايا عصبية تؤدي عملها، فلماذا تبدو حقيقية إلى هذه الدرجة، بل لماذا هي حقيقية إلى هذه الدرجة بالفعل؟ إنها تبدو لنا حقيقية لأن لها معنى حقيقيًّا، وهو معنى استقيناه من بوتقة الانتقاء الطبيعي، معنى يأتي من الحياة الحقيقية، بل ومن الموت الحقيقي. إن المشاعر هي في حقيقتها شفرة عصبية، إلا أنها شفرة نابضة بالحيوية، غنية بمعانٍ اكتُسِبَتْ على مدى ملايين بل مليارات من الأجيال. ما زلنا لا نعرف كيف تفعل خلايانا العصبية هذا، ولكن الوعي في أساسه يتعلَّق بالحياة والموت، وليس بالقمم العالية الرائعة للعقل البشري. وإذا أردنا حقًّا أن نفهم ماهية الوعي وكيف صار إلى ما صار إليه، فلا بد أن نخرج أنفسنا من ذلك الإطار الذي قيَّدْنا أنفسنا فيه.

الفصل العاشر

الموت

ثمن الخلود

يُقال إنه ليس بالإمكان شراء السعادة بالمال. لكن كرويسوس، آخر ملوك ليديا في العصور الغابرة، كان من الثراء بحيث ظنَّ نفسه أسعد رجل في العالم. وحين حاول الحصول على إقرار من السياسي الأثيني صولون بذلك، وكان وقتها يسافر مارًّا بأراضيه، تكدَّرَ حين قال له: «لا يمكن اعتبار أي إنسان سعيدًا حتى يموت.» فمن الذي يمكنه التنبؤ بما تخبئه له الأقدار؟ ثم حدث أن وقع كرويسوس، وهو يحارب وفق نصيحة كاهن غامض من كهنة دلفي، أسيرًا في يد قورش ملك الفرس، فأُحكم وثاقه فوق كومة حطب بهدف إحراقه حيًّا. ولكن بدلًا من أن يوبخ كرويسوس آلهته المزعومة بسبب نهايته المفزعة التي آل إليها، وجدوه يتمتم: «صولون». فتعجب قورش منه، واستفسر ممن معه عما يعنيه؛ فأخبروه بقصة صولون. فأدرك حينئذٍ أنه هو أيضًا لعبة بيد الأقدار؛ فأمر قورش بفك قيود كرويسوس وعيَّنَه مستشارًا له (وقد قال البعض إن أبوللو، أحد آلهة الإغريق، جاء لنَجْدته ومعه عاصفة رعدية).

كانت الميتة الحسنة تعني الكثير للإغريق القدماء وكانوا يعتبرون القَدَر والموت لعبتين بأيدٍ خفية، تعملان بأكثر الطرق مكرًا على جعل الرجال الأشداء يركعون في ضعف وهوان. والمسرح الإغريقي حافل بأدوات التعذيب، وبالموت الذي رسَمَتْه الأقدار، وأوردته نبوءات الكهنة المبهمة. وكما ورد في طقوس باخوس الجنونية وخرافات التحولات الجسدية، يبدو أن الإغريق كانوا يعزون شيئًا من مذهبهم القَدَري الحتمي إلى

العالم الطبيعي. والعكس بالعكس؛ فمن منظور الثقافة الغربية، أحيانًا ما يبدو نُفُوق الحيوانات وقد اكتسب مسحة من المسرح الإغريقي.

فهناك ما هو أكثر من عنصر التراجيديا الإغريقية، على سبيل المثال، فيما يختص بذباب مايو، الذي يعيش شهورًا معدودة كيرقات، ثم يتحوَّل إلى حشرات بالغة محرومة من أجزاء الفم والقناة الهضمية. وحتى الأنواع القليلة التي تعيش يومها المعربد الوحيد، لا تلبث أن يكون مصيرها الموت جوعًا. وماذا عن سَمَك السالمون الذي يعيش في المحيط الهادئ ويهاجر بأعداد كبيرة لمئات الأميال، حتى يصل إلى الأنهار التي وُلِد فيها؛ حيث تنتهي رحلة تلك الأسماك المشحونة بالهرمونات والمفعمة بالنشاط الهائج بشكل مأسوي بالنفوق في غضون أيام قلائل؟ أو ملكة النحل، التي لا تظهر عليها أي علامات للسن لمدة ستة عشر عامًا، إلى أن يجف زادها من السائل المنوي، وحينئذٍ تهاجمها بناتها من النحل الشغالة وتقطعها إربًا إربًا حتى الموت؟ أو سعار الجماع الذي يصيب الفأر الجرابي الأسترالي لمدة اثنتي عشرة ساعة متواصلة؛ مما يؤدي إلى نفوقه بسبب الوهن والإرهاق الشديدين، وهو الأمر الذي يمكن منعه بإخصائه؟ وسواء وُصِفَ هذا الموقف بالمأساة أو الملهاة فلا شك أنه درامي. فتلك الحيوانات رهائن للقَدَر، مثل أوديب ذاته. وليس الموت أمرًا حتميًّا فحسب، بل إنه خاضع للأقدار ومبرمج في داخل نسيج الحياة ذاتها.

ومن بين القصص المنفِّرة للموت، لعل أكثرها مأسوية وشهرة لنا اليوم هي أسطورة تيثونوس الطروادي الخرافية، الذي طلبت حبيبته الإلهة من كبير الآلهة زيوس أن يمنحه الخلود، ولكنها نسيت أن تطلب له الشباب الدائم. وقال هوميروس في تلك القصة إن «الشيخوخة الكريهة جثمت بكل ثقلها على تيثونوس»، جاعلة إياه يخرف ويهذي كالأحمق بلا نهاية. وقد تخيله الشاعر الإنجليزي ألفريد تنيسون ناظرًا إلى أسفل إلى «الحقول المعتمة، حول بيوت الرجال السعداء الذين من الممكن أن يموتوا، وإلى المقابر المعشوشبة للموتى الأكثر سعادة.»

إن هناك تعارضًا بين هذه الصور من الموت، بين الموت العاجل المبرمج في حياة بعض الحيوانات، وبين الشعور بالوحدة والاستسلام للشيخوخة التي تواجه الإنسانية وحدها، ذلك الافتقاد للموت المبرمج وما يصاحبه من نهاية مريعة شأن نهاية تيثونوس. هذا تحديدًا ما نسببه لأنفسنا اليوم مع تقدُّم الطب، وإطالة أعمار البشر لكن دون تحسين صحتهم. فكل عام يُضاف إلى متوسط أعمار البشر، مع تقدُّم العلوم الطبية الحديثة، تقابله أشهر قليلة يقضيها المرء في صحة طيبة، أما باقي الوقت فيعاني الإنسان

فيه تدهورًا مستمرًّا. ومثلما فعل تيثونوس في أسطورته، فإننا نتمنى في نهاية المطاف الموت. قد يبدو الموت لنا كمزحة كونية قاسية، ولكن الشيخوخة في الحقيقة حالة كئيبة.

لكن لا حاجة بنا إلى أن نقلِّد تيثونوس في سنوات شيخوختنا. بالتأكيد لا تسمح قوانين الفيزياء الراسخة بالشباب الدائم مثلما لا تسمح بالحركة المستمرة، ولكن التطوُّر مَرِنٌ على نحوٍ يثير الدهشة، ويظهر لنا أن الحياة الأطول تكون في العادة مصحوبة بشباب أطول، بما يُجنِّبنا بؤس تيثونوس. وهناك الكثير من أمثلة الحيوانات التي امتدت أعمارها دون آلام تُذكَر؛ أي بدون أمراض ذات بال، بمعدل يزيد عن طولها الأصلي بضعفين أو ثلاثة، وربما أربعة أضعاف؛ حينما تتغيَّر ظروف حياتها. ومن الأمثلة العجيبة على هذا سَمَك السالمون المرقط الذي يعيش في الجداول المائية، والذي نُقِل إلى المياه الباردة الفقيرة في المواد الغذائية لإحدى البحيرات في سييرا نيفادا بولاية كاليفورنيا الأمريكية. فقد طال عمر الأسماك بمعدل أربعة أضعاف — من ستة أعوام إلى أكثر من أربعة وعشرين عامًا — وكان «الثمن» الظاهري الوحيد لهذا التطور هو تأخير نضجها الجنسي. ولقد سُجِّلَت اكتشافات مشابهة بين الثدييات؛ مثل حيوانات الأبوسوم. فحينما عاشت في جزر منعزلة محمية من الافتراس على مدى بضعة آلاف من السنين، عاشت الأبوسومات لأكثر من ضِعْف عمرها الطبيعي، وكانت تشيخ بنصف المعدل الأصلي. ونحن البشر أيضًا تضاعفت أعمارنا القصوى على مدى ملايين السنين القليلة الأخيرة دون أي عواقب ضارة واضحة. ومن وجهة النظر التطورية، يجب أن نعتبر أسطورة تيثونوس محض خرافة.

إلا أن البشرية ظلَّتْ تلتمس الحياة السرمدية على مدى آلاف السنين، وأخفقت في الوصول إليها. صحيحٌ أنَّ أَوْجُهَ التقدُّم في مجالَيِ الصحة العامة والطب كانت سببًا لما حدث من زيادة في متوسط أعمار البشر، إلا أن العمر الأقصى — وهو حوالي ١٢٠ عامًا — ظلَّ ثابتًا دون تغيير بالرغم من جميع الجهود البشرية. وفي فجر التاريخ المدوَّن كان جلجامش ملك أورك يلتمس الحياة الأبدية في صورة نبات خرافي، وبعد سعيه البطولي الدءوب انسلَّ النبات الوهمي من بين أصابعه مثل خرافة. ومنذ ذلك الوقت لم يتغيَّر الحال. فقد ظهرت أوهام أخرى مثل إكسير الحياة والكأس المقدسة، وطحين قرن الحصان أحادي القرن الخرافي، وحجر الفلاسفة واللبن الزبادي، والميلاتونين، وكلها أشياء زُعِم أنها تطيل الأعمار، دون أن يحدث هذا فعلًا. ويمتلئ تاريخ أبحاث تجديد الشباب بالعديد من الدجالين والباحثين أيضًا. حتى إن العالم البيولوجي الفرنسي الشهير

شارل براون سيكوار حقن نفسه بخلاصات من خصي الكلاب والخنازير الغينية، وزعم أنه بات يشعر بتحسن في نشاطه وقدرته العقلية، متقدِّمًا بزعمه هذا إلى الجمعية البيولوجية في باريس عام ١٨٨٩، بل إنه استعرض متفاخرًا تيَّار بَوْله المتدفِّق في شكل قوس أمام عدد من أعضاء الجمعية المذهولين مما يرونه. وفي نهاية ذلك العام كان ١٢ ألف طبيب يُقَدِّمون لمرضاهم هذا السائل الذي استعمله براون سيكوار ولم يلبث الجراحون في أصقاع الأرض أن بدءوا يزرعون في مرضاهم شرائح من الخصي المأخوذة من الماعز والقرود، بل والمساجين. ولعل أشهر أولئك الدجالين الأمريكيين على الإطلاق كان المدعو جون آر برينكلي؛ إذ صنع ثروة طائلة من زرع أجزاء من غدد الماعز في المرضى، قبل أن يموت رجلًا محطمًا، ضحيةً لألف من الدعاوي القضائية التي رُفِعَتْ ضده. ويبدو من المشكوك فيه أن تكون البشرية قد أضافت يومًا واحدًا لما قُدِّرَ لها من أعمار في هذه الدنيا، بالرغم من كل تلك المحاولات الإبداعية المتفاخرة.

إذن، هناك فجوة غريبة بين مرونة التطور — أي السهولة التي يبدو أن الأعمار تتشكَّل بها — وبين الجمود الصريح الذي يكتنف جهودنا حتى اليوم. فكيف يطيل التطور الأعمار بهذه السهولة؟ من الواضح ممَّا مَرَّ بنا من آلاف السنين من الفشل الذريع أننا لن نُحقِّق أي نجاح في هذا المضمار ما لم نفهم الأسباب الأكثر عمقًا للموت. من الظاهر، يبدو الموت «اختراعًا» محيِّرًا؛ إذ يعمل الانتقاء الطبيعي بصورة طبيعية على مستوى الكائنات المفردة، ومن الصعب أن أدرك فائدة الموت لي بوصفي فردًا، أو ما يجنيه سمك السالمون الباسيفيكي من تمزُّقه إلى أشلاء، أو ما تستفيده عناكب الأرملة السوداء من التهام بعضها بعضًا. ولكن من الواضح بنفس القَدْر أن الموت ليس أمرًا عرضيًّا، ولا شك أنه تطوَّرَ لمنفعة الأفراد (أو لمنفعة جيناتهم الأنانية، على حدِّ قول ريتشارد دوكينز الذي لا يُنسى) وذلك بعد بزوغ فجر الحياة نفسها مباشرةً. لذا، إذا أردنا أن نُحسِّن نهايتنا، وأن نتجنَّب آلام تيثونوس، فحريٌّ بنا أن نعود إلى البداية.

تخيَّلْ أنك عُدْتَ بآلة الزمن ٣ مليارات سنة إلى الوراء في منطقة من المياه الساحلية الضحلة. أول ما ستلاحظه عندئذٍ هو أن السماء ليست زرقاء اللون، بل حمراء ضبابية غائمة، بما يذكرنا إلى حدٍّ ما بكوكب المريخ. تعكس البحار الساكنة درجات من اللون الأحمر. والجو دافئ باعتدال في هذه الغيوم، وإن كانت الضبابية الزائدة تمنع رؤية الشمس بوضوح. لا يُوجَد على اليابسة شيء يجذب العين. فالصخور عارية، مع رقع رطبة

باهتة اللون هنا وهناك من البكتيريا التي تتعلق في ضعف بأي شيء تجده في الأرض. لا يُوجَد نجيل ولا نباتات من أي نوع. ولكن إذا خُضْتَ المياه الضحلة فستجد كميات لا حصر لها من قباب من صخور خضراء اللون، وهي تبدو حية في طبيعتها، ويصل أعلاها إلى ارتفاع متر تقريبًا. لا تزال تُوجَد بعض التراكيب النادرة المشابهة في أقصى الخلجان التي يتعذَّر الوصول إليها على كوكبنا الأرضي اليوم وتُسمَّى الصخور النسيجية (الستروماتوليتات). ولا شيء آخر يتقلَّب في المياه؛ لا أسماك هناك، ولا أعشاب بحرية، ولا سرطانات نشطة قوية، ولا شقائق نعمان متموجة. وإذا خلعت كمامة الأكسجين التي ترتديها، فسرعان ما ستدرك السبب؛ إذ ستختنق حينئذٍ في دقائق معدودة. فلا يكاد يكون ثمة أكسجين، ولا حتى بالقرب من الصخور النسيجية، إلا أن ما تحتوي عليه هذه الصخور من بكتيريا خضراء مزرقة يبدأ في إضفاء مسحات من ذلك الغاز الحيوي على الهواء. وفي غضون مليار سنة تكون انبعاثاتها في النهاية قد أضفَتْ على كوكبنا الألوان الخضراء والزرقاء المبهجة. وحينئذٍ فقط يمكننا أن نُسمِّي هذا المكان المقفر موطننا.

وإذا نظرنا إلى الأرض في تلك المرحلة المبكرة من الفضاء، واستطعنا اختراق حجب الضباب الأحمر الغائم، فلن نرى سوى مظهر واحد يُعتبَر بالتقريب هو نفس مظهرها اليوم؛ وهي المستعمرات الطحلبية التي تتكوَّن أيضًا من البكتيريا الزرقاء وثيقة الصلة بتلك التي تُوجَد في الصخور النسيجية، ولكنها تطفو في قطع شاسعة في البحار. وهي تبدو من الفضاء شبيهة إلى حد بعيد بالمستعمرات الطحلبية الحديثة، وتبدو تلك الحفريات العتيقة تحت المجهر مشابهة للبكتيريا الزرقاء الحديثة، مثل التريكودزميوم. وتستمر تلك المستعمرات مدة أسابيع، وينشط نموها السريع بفعل معادن يحملها البحر من الأنهار أو تُحمَل لأعلى من أعماق المحيطات بتأثير التيارات الصاعدة، ثم لا تلبث بين عشية وضحاها أن تندثر، وتذوب في الماء الذي لا يعكس مرة أخرى سوى صورة السماء الحمراء الخالية من مظاهر الحياة. وفي وقتنا هذا أيضًا تذوب المستعمرات الطحلبية في المحيطات الشاسعة بين عشية وضحاها دون سابق إنذار.

لم نَصِلْ إلى إدراك لما يحدث بالضبط إلا حديثًا. فهذه الحشود الشاسعة من البكتيريا لا تموت تلقائيًّا، وإنما تقتل أنفسها عمدًا؛ إذ يحتوي كل نوع أزرق منها في داخله على آلية للموت في صورة جهاز عتيق من الإنزيمات — الشبيهة على نحوٍ ملحوظ بالإنزيمات الموجودة داخلنا — مخصص لتفكيك الخلية من الداخل. تبدو فكرة إذابة البكتيريا لنفسها مضادة للبديهة لدرجة أن الباحثين كانوا يميلون إلى إغفال الدلائل

عليها، ولكنها صارت الآن أقوى من أن يُغَض الطرف عنها. والحقيقة هي أن البكتيريا تموت «عمدًا»، وتوحي الأدلة الجينية التي ساقها بول فالكوفسكي وكاي بيدل بجامعة روتجرز في ولاية نيوجرسي أنها ظلَّتْ تفعل هذا على مدى ثلاثة مليارات سنة. فلماذا؟

لأن الموت مفيد. فالتجمعات البكتيرية تتكون مما لا حصر له من تريليونات الخلايا المتشابهة جينيًّا، إن لم تكن متطابقة. إلا أن الخلايا المتطابقة جينيًّا لا تكون متماثلة دائمًا. وما عليك سوى أن تفكر في أجسام البشر؛ إذ تُوجَد بها مئات عدة من أنماط الخلايا المختلفة، وكلها متطابقة جينيًّا. إلا أن الخلايا تتطور بشكل مختلف أو تتمايز؛ استجابةً لمؤثرات كيميائية مختلفة بشكل طفيف آتية من البيئة، التي تعني في حالتنا هذه الخلايا المحيطة. وفي حالة المستعمرات البكتيرية، تتضمن البيئة الخلايا الأخرى، وبعضها يبعث بعوامل كيميائية، أو حتى بسموم مباشرة، فضلًا عن عوامل الضغط الفيزيائية مثل مستوى ضوء الشمس، وتوفر المواد الغذائية، والعدوى الفيروسية ... إلخ. ومن ثم فإنها قد تكون متطابقة جينيًّا ولكن بيئتها تهاجمها بشراسة بطرق متفاوتة على طول المدى، وهذا هو أساس تمايز تلك الخلايا.

منذ ثلاثة مليارات عام شهدت الأرض أولى علامات التمايز؛ وهي أن بدأت الخلايا المتطابقة جينيًّا في اتخاذ مظاهر متفاوتة ومتشعبة، بما يوجهها نحو مصائر مختلفة، اعتمادًا على تاريخ حياتها. فبعضها يصير أبواغًا صلبة مقاومة للظروف السيئة، وبعضها الآخر يكوِّن أغشية رقيقة لزجة (أغشية حيوية) تلتصق بالأسطح المغمورة بالمياه مثل الصخور، والبعض الثالث يزدهر مستقلًّا وبعيدًا عن أصوله القبلية، وبعضها الأخير يموت ببساطة.

ولكن، لا يموت هذا البعض الأخير ببساطة، وإنما على نحوٍ مُعقَّد. ليس من المعروف لدينا بالتأكيد كيفية نشوء تلك الآلية المعقدة للموت في البداية. ولكن أكثر الاحتمالات ترجيحًا هي نشوءُها من خلال تفاعل البكتيريا مع ملتهمات البكتيريا؛ وهو نوع من الفيروسات التي تصيب البكتيريا بالعدوى فتقتلها وتلتهمها من الداخل. تُوجَد الدقائق الفيروسية في المحيطات الحديثة بوفرة صادمة؛ إذ يُوجَد منها مئات الملايين في كل مليلتر من مياه البحر، أي ما لا يقل عن ضعفَيْ مقدار البكتيريا. ونكاد نجزم بأنها كانت تُوجَد بكميات مقاربة لذلك في العصور الغابرة. وتعد الحرب المستمرة بلا توقف بين البكتيريا وملتهماتها الفيروسية إحدى القوى الأكثر أهمية، والأقل ذكرًا، في مجال التطور. ومن المرجح أن الموت المبرمج نبع بوصفه أحد الأسلحة المبكرة في هذه الحرب.

ثمة مثال بسيط لما نقول وهي العمليات التي يحدث فيها تضاد بين سم ومضاده ويوظِّفها الكثير من ملتهمات البكتيريا. تحتوي هذه الملتهمات على عدد قليل من الجينات، لكنها تتمكن من استخدام جيناتها في تشفير إنتاج نوع من السم، يمكنه قتل بكتيريا العائل، بالإضافة إلى إنتاج مضاد للسم يحمي البكتيريا من تأثير السم. ويكون السم طويل المفعول، بينما ترياقه قصير العمر. فأما البكتيريا التي تُصاب بالعدوى فإنها تنتج كلًّا من السم وترياقه فتنجو من الموت السريع، وأما البكتيريا الساذجة أو المصابة بالعدوى ولكنها تعمل جاهدة على التحرر من الأغلال الفيروسية، فإنها تكون عرضة للتأثر بالسم فتموت. وأبسط طريقة يمكن أن تتبعها البكتيريا قليلة الحيلة هي أن تقبض على الجين المتخصص في إنتاج الترياق وتُدخله في جينومها هي، فيكسبها الحماية حتى وإن لم تُصَبْ بالعدوى. وهكذا تتقدَّم الحرب، مع نشوء سموم ومضادات لها أكثر تعقيدًا، وتنمو آلة الحرب بشكل أكثر غرابة. قد تكون هذه هي الطريقة التي نشأت بها ما تُسمَّى إنزيمات «الكاسباز» لأول مرة؛ ربما في البكتيريا الزرقاء.[١] فهذه البروتينات المتخصصة في «الموت» تمزق الخلايا من الداخل. وهي تعمل في تسلسلات متتابعة؛ إذ ينشِّط أحد إنزيمات الموت الإنزيم الذي يليه في هذا التسلسل، إلى أن يتكوَّن جيش بأكمله من إنزيمات الإعدام التي تنقضُّ على الخلية فتهلكها.[٢] المهم في الأمر أن كل إنزيم من إنزيمات الكاسباز يُوجَد له ما يثبِّطه، وهو «مضاد» يمكنه إحباط تأثيره. ولعل تلك المنظومة كلها من السموم ومضاداتها، التي يتم بتجميعها تحقيق مستويات متعددة من الهجوم والدفاع، إنما تنم عن الصراع التطوري الطويل المستمر بين البكتيريا وملتهمات البكتيريا.

صحيح أن تلك المعارك بين البكتيريا والفيروسات تقع على الأرجح عند الجذور العميقة للموت، إلا أن ما يحدث من انتحار إنما يفيد البكتيريا بلا شك، حتى في غياب العدوى. تنطبق المبادئ نفسها؛ فأي تهديد مادي مصحوب بالقدرة على استئصال شأفة المستعمرة بكاملها (مثل الإشعاع فوق البنفسجي الشديد أو الحرمان من المواد الغذائية) يمكن أن يقدح زناد عملية الموت المبرمج لدى مستعمرات البكتيريا الزرقاء. تنجو أقوى الخلايا من هذا التهديد عن طريق التطور إلى أبواغ صلبة تشكِّل بذورًا للمستعمرة التالية، بينما تستجيب شقيقاتها الأضعف، إذا كانت متطابقة جينيًّا، لنفس التهديد بأن تشغِّل آلية الموت. لا يُحْدِث النَّظَرُ إلى هذه الممارسات باعتبارها قتلًا أو انتحارًا فارقًا كبيرًا. ولكن يمكننا القول في حيادية إن الناتج ببساطة هو إمكانية أن يعيش المزيد من

نسخ الجينوم البكتيري على مدار الزمن التطوري إذا تَمَّ التخلص من الخلايا التالفة. إنها أبسط صورة للتمايز الخلوي، وهي اختيار ثنائي بين الحياة والموت، اعتمادًا على تاريخ حياة الخلايا المتطابقة.

هذا المنطق نفسه ينطبق بقوة أشد على الكائنات متعددة الخلايا. فهنا تكون الخلايا دائمًا متطابقة جينيًّا، وترتبط مصائرها معًا برباط أوثق مما يحدث في حالة مستعمرة مفككة أو تجمُّع طحلبي. وحتى إذا كان الكائن في صورة كرة بسيطة، فإن التمايز يكون أمرًا حتميًّا تمامًا؛ فهناك فرق بين ما بداخل تلك الكرة وما هو خارجها من حيث: توافر المواد الغذائية، والأكسجين، وثاني أكسيد الكربون، والتعرُّض للشمس، أو للتهديد من الأعداء. لا يمكن أن تكون الخلايا متماثلة تمامًا، حتى إذا «أرادت» هذا. وسرعان ما تبدأ أبسط عمليات التأقلم في أن تأتي أكلها. فكثير من الطحالب — مثل طحلب الفولفوكس كروي الشكل — في مراحل معينة من تطورها يكون لديها أهداب طويلة تشبه الأسواط، تستخدمها في الحركة. ومن المفيد أن يكون لدى مستعمرة كروية الشكل كتلك خلايا مزوَّدة بأسواط من الخارج؛ إذ إن حركتها المجمَّعة تُحرِّك المستعمرة بكاملها، بينما تبقى الأبواغ (وهي مرحلة تطورية مختلفة للخلايا المتطابقة جينيًّا) محمية بالداخل. وهذا التقسيم البسيط للعمل لا بد أنه مَنَحَ المستعمرات البدائية الأولى ميزة كبيرة فوق الخلايا المفردة. وميزة التمتع بتلك الأعداد الكبيرة وتخصصها يمكن تبيُّنها أيضًا في المجتمعات البشرية الزراعية الأولى، حيث كان الطعام، لأول مرة، وفيرًا بدرجة تكفي لدعم السكان كثيري العدد مما أتاح تكريسهم لمهام تخصصية؛ مثل: البستنة، وتصنيع المعادن، والاشتغال بالطب والقانون، والبناء، وخوض الحروب. ولا عجب أن حلَّت المجتمعات الزراعية سريعًا محل القبائل الصغيرة التي كانت تمارس الصيد وجمع الثمار؛ حيث كان التخصص المشابه مستحيلًا تمامًا.

وحتى أبسط المستعمرات تظهر بالفعل اختلافًا أساسيًّا بين نوعين من الخلايا؛ هما: الخلايا الجنسية (أو الأمشاج)، وخلايا الجسم (أو الخلايا الجسدية). كان أول من لاحظ هذا التمايز هو البيولوجي التطوري الألماني أوجست فايسمان (وقد صادفناه بالفعل في الفصل الخامس)، ولعله أكثر متبعي المذهب الدارويني في القرن التاسع عشر تأثيرًا وتعمُّقًا بعد داروين. ولقد افترض فايسمان أن الخلايا الجنسية هي وحدها الخالدة؛ إذ تمرر الجينات من جيل إلى الجيل الذي يليه، بينما تكون الخلايا الجسدية قابلة للهلاك، وأنها مجرد وسائل مساعدة للخلايا الجنسية الخالدة. تعرَّضَتْ هذه الفكرة للتكذيب على

مدى نصف قرن مِنْ قِبَل العالم الفرنسي الشهير ألكسي كاريل الحائز على جائزة نوبل، الذي تعرَّض هو نفسه للتكذيب فيما بعد ولحق به العار؛ لأنه اختلق بياناته. لقد كان فايسمان محقًّا. وتمييزه هذا لنوعي الخلايا يُفسِّر في نهاية الأمر موت جميع الكائنات متعددة الخلايا. إن التخصص الخلوي يعني بطبيعته أن بعض الخلايا فقط في الجسم يمكن أن تكون خلايا جنسية، بينما يجب على الباقي أن يلعب دورًا داعمًا؛ إذ تكون الفائدة الوحيدة لتلك الخلايا الجسدية أن تتلقى الجينات الوراثية المشتركة التي تُمرَّر إليها من الخلايا الجنسية. وما إن تتقبَّل الخلايا الجسدية دورها التابع وتنجزه، حتى يصير توقيت موتها خاضعًا أيضًا لاحتياجات الخلايا الجنسية.

ويتضح الفارق بين المستعمرة وبين الكائن متعدد الخلايا الحقيقي على الوجه الأمثل في ضوء الالتزام بالتمايز. فالطحالب البسيطة نسبيًّا، مثل الفولفوكس، تنتفع بالحياة المجمعة ولكنها أيضًا تختار العيش حرة وتعيش كخلايا منفردة. إن الاحتفاظ بإمكانية الاستقلالية يقلص درجة التخصص التي يمكن الحصول عليها. فمن الواضح أن الخلايا التي في درجة تخصص الخلايا العصبية مثلًا لا يمكنها العيش حرة. ولا يمكن تحقيق حياة متعددة الخلايا حقيقية إلا من قبل خلايا «جُهِّزَتْ» لإخضاع أنفسها بالكامل لسبب وجودها واستمرارها. يجب الحفاظ على التزامها هذا، وأي محاولات منها للنكوص والارتداد إلى حالة الاستقلالية تُعاقَب بالموت، ولا شيء آخر يصلح. ولنفكِّر فيما يحدث من دمار نتيجة لمرض السرطان، حتى في يومنا هذا، بعد مليار عام من الحياة متعددة الخلايا، لندرك استحالة تلك الحياة إذا أُصِيبَت الخلايا بالجنون واستقلت بذاتها على هواها. فالموت وحده هو الذي يجعل الحياة متعددة الخلايا ممكنة. وبطبيعة الحال، بدون الموت لن يكون ثمة تطور، وبدون البقاء التمايزي للخلايا لن يكون للانتقاء الطبيعي دور.

وحتى في أوائل الكائنات متعددة الخلايا لم يتطلَّب تهديدُ الخلايا بعقوبة الموت، بسبب انتهاكها للقوانين، إجراءَ قفزة تطورية كبيرة. وإذا رجعت إلى الفصل الرابع فستجد أن الخلايا «حقيقية النوى» المعقَّدة تكوَّنَتْ أصلًا من اندماج بين نوعين من الخلايا: خلية العائل، والبكتيريا التي تطوَّرَتْ فيما بعد إلى الميتوكوندريا. وتلك بدورها هي محطات لتوليد الطاقة التي صارت تُولِّد الطاقة للخلية. كانت أسلاف الميتوكوندريا مجموعة من البكتيريا حرة المعيشة التي احتوت (مثل البكتيريا الزرقاء) على إنزيمات الكاسباز المطلوبة لتمزيق الخلايا من الداخل وقتلها. ليس مهمًّا من أين حصلت على تلك

الإنزيمات (فمن المحتمل أنها انتقلت إليها من البكتيريا الزرقاء، أو العكس بالعكس، أو أن كلتا المجموعتين ورثت إياها من سلف مشترك شديد القِدَم). الفكرة الرئيسية هنا أن الميتوكوندريا زودت الخلايا حقيقية النوى الأولى بآلة الموت، العاملة بفاعلية كاملة.

من التساؤلات المثيرة للاهتمام ما إذا كان بمقدور حقيقيات النوى أن تتطوَّر بهذا النجاح إلى كائنات متعددة الخلايا دون أن ترث إنزيمات الكاسباز من البكتيريا، ولكن في وجود إنزيمات الكاسباز لم يكن ثمة سبيل لوقفها. ولقد نشأت خاصية تعدد الخلايا الحقيقية بشكل مستقل خمس مرات على الأقل في حقيقيات النوى: في الطحالب الحمراء، والطحالب الخضراء، والحيوانات، والفطريات، والنباتات.[٣] من حيث البنية التنظيمية لا يُوجَد سوى قليل من الأمور المشتركة بين أشكال الحياة هذه، ولكنها جميعًا تضبط خلاياها وتعاقبها على أي نكوص منها بالموت باستخدام إنزيمات كاسباز متشابهة إلى حدٍّ بعيد. ومما يثير الاهتمام أنه في جميع الحالات تقريبًا لا تزال الميتوكوندريا هي وسائط الموت الرئيسية، والمحاور الرئيسية داخل الخلايا التي تجمع الإشارات المتصارعة، وتمنع الصخب، وتشغل آلة الموت عند الضرورة. ومن ثم مع أن موت الخلية ضروري لأي شكل من أشكال الحياة متعددة الخلايا، فإن الأمر لم يتطلب إلا القليل من الإبداع التطوري. فآلية الموت المطلوبة جاءت إلى أوائل الخلايا حقيقية النوى عن طريق الميتوكوندريا، ولا تزال كما هي إلى حد بعيد حتى يومنا هذا، وإن كانت تعقدت بدرجة طفيفة.

ولكنَّ هناك فارقًا كبيرًا بين موت الخلايا وموت الكائنات نفسها. فالموت الخلوي يلعب دورًا مهمًّا في شيخوخة الكائنات متعددة الخلايا وموتها، إلا أنه لا يُوجَد قانون يفرض أن تموت «كل» الخلايا الجسدية، أو يمنع الخلايا الأخرى القابلة للتخلص منها بنفس الدرجة من أن تحل محلها. إن بعض الحيوانات مثل حيوان شقائق نعمان المياه العذبة الذي يُسمَّى «الهيدرا» تُعَدُّ خالدة بالأساس؛ صحيح أن خلاياه تموت ويتم استبدالها، ولكن الكائن ككلٍّ لا تبدو عليه أي دلائل على الشيخوخة؛ إذ يُوجَد توازن طويل الأمد بين حياة الخلايا وموتها. ويشبه هذا الأمر جدولًا مائيًّا متدفقًا. فلا يمكن أن يخوض المرء في نفس ذلك الجدول مرتين؛ لأن مياهه تتدفَّق وتتجدَّد بلا انقطاع ويتم استبدالها باستمرار، إلا أن حدود الجدول وحجمه وشكله تبقى كما هي بلا تغيير. وفي نظر أي شخص، باستثناء فلاسفة اليونان، سيبدو أنه نفس الجدول دون تغيُّر. وبالمثل، فإن خلايا الكائن الحي تتبدَّل مثل المياه، لكن الكائن ككلٍّ لا يتغيَّر. فأنا أبقى كما أنا، وإن تغيَّرت خلاياي.

لا يمكن أن يسري الأمر على نحو مختلف. فإذا اختل التوازن بين حياة الخلايا وموتها، فلن يكون الكائن أكثر استقرارًا من جدول مائي، سواء في حالة فيضان أو جفاف. فإذا استطعت ضبط إعدادات «الموت» بحيث تقلِّل احتمال موت الخلايا كثيرًا، فستكون النتيجة هي النمو السرطاني الخارج عن السيطرة. وإذا زدت احتمال موت الخلايا كثيرًا، فستكون النتيجة هي الشيخوخة السريعة. إن السرطان والتنكس الخلوي وجهان لعملة واحدة. وكلاهما يهلكان حياة الكائنات عديدة الخلايا. ولكن الهيدرا البسيطة يمكنها أن تحفظ توازنها لأمد طويل جدًّا، ويستطيع البشر الحفاظ على نفس الوزن والبنية عقودًا عدة بالرغم من استبدال مليارات الخلايا يوميًّا. ولا يُفقَد هذا التوازن إلا حينما يشيخ المرء، وحينئذٍ نتعجَّب حينما نعاني من وجهي العملة في وقت واحد. فالسرطان والأمراض التنكسية كلاهما يرتبط بالضرورة بالتقدُّم في السن. فلماذا إذن تشيخ الكائنات الحية وتموت؟

إن أكثر الأفكار شيوعًا في هذا الصدد، التي طرحها فايسمان في عقد الثمانينيات من القرن التاسع عشر هي فكرة خطأ، ولقد أدرك هو نفسه هذا الخطأ سريعًا. فلقد افترض فايسمان أصلًا أن الشيخوخة والموت يخلصان المجتمعات البشرية من العجائز المصابين بالبلى والهرم، ويستبدلان بهم نماذج جديدة نشطة من صغار السن والشباب مزوَّدة بطاقم جديد من الجينات المختلطة بفضل التكاثر الجنسي. هذه الفكرة تضفي على الموت نوعًا من النبل والتناسق، وتجعله يحدث في سبيل هدف أسمى، حتى إن كان بالكاد هدفًا دينيًّا جليلًا. من هذا المنظور يكون موت الفرد مفيدًا للنوع، تمامًا مثلما يكون موت بعض الخلايا مفيدًا للكائن الحي. إلا أن هذا الافتراض يدور في دائرة مفرغة، كما قال منتقدو فايسمان؛ فالأشخاص المسنون لا يعانون البلى والهرم إلا إذا أُصِيبوا بالشيخوخة في المقام الأول، ومن ثم فإن فايسمان افترض مسبقًا وجود ما كان يحاول أن يُفَسِّره من الأساس. بقي السؤال كما هو: ما الذي يجعل الأشخاص يُصابون بالبلى مع التقدُّم في السن، حتى إذا كان الموت يفيد المجتمعات البشرية؟ ما الذي يجب فعله لمنع الغش المتمثل في الأشخاص الذين ينجون من الموت مثل الخلايا السرطانية، والذين ينجبون المزيد من الذرية، وكلٌّ منهم مُزوَّد بنفس الجينات الأنانية؟ وما الذي يجب فعله لإيقاف أي سرطان في المجتمعات البشرية؟

كان أول من قَدَّم الإجابة الداروينية هو بيتر مدوَّر في محاضرته الافتتاحية الشهيرة في كلية لندن الجامعية في عام ١٩٥٣. وكانت إجابته أن هناك احتمالية إحصائية لموت

الفرد بغضِّ النظر عن التقدُّم في السن؛ إذ يمكن أن تصدمه حافلة أو قطار، أو يسقط على رأسه حجر من السماء أو يأكله نمر أو يُصاب بمرض قاتل. وحتى إذا لم يَمُت المرء على المدى الطويل، فلن يعيش إلى الأبد بلا نهاية. فالأشخاص الذين يركزون مواردهم التكاثرية في الجزء المبكر من حياتهم يكونون بهذا أكثر ترجيحًا من الناحية الإحصائية لأن يحظوا بذرية أكثر من الأشخاص الذين يتبعون أسلوب عدم التعجل والذين يتكاثرون، مثلًا، بمعدل مرة كل ٥٠٠ عام، ويندمون على فَقْدِهم لصوابهم بعد ٤٥٠ عامًا فقط. فمن يقرر التزاوج والإنجاب مبكرًا يكون لديه المزيد من الذرية التي ترث جيناته «التزاوجية المبكرة» أكثر من أقربائه المتأخرين في الإنجاب. وهنا تكمن المشكلة.

يقول مدوَّر إن كل نوع من الكائنات يتمتع بمدى عمريٍّ إحصائيٍّ محتمل، وهو يعتمد على حجم الأفراد، ومعدل أيضهم، وأعدائهم الطبيعيين من المفترسات، وما يتمتَّعون به من خصائص بدنية كالأجنحة، وغير ذلك. فإذا كان المدى العمري الإحصائي ذلك عشرين عامًا مثلًا، فإن الأفراد الذين يكملون دورتهم التكاثرية خلال هذه المدة سيخلِّفون وراءهم المزيد من الذرية أكثر من الذين لا يفعلون ذلك. والجينات التي «تُقْدِم على المخاطرة» ستبلي بلاءً أفضل من تلك التي لا تفعل ذلك. ومن ثم خلص مدوَّر إلى أنه في نهاية الأمر الجينات التي يمكن أن تُسبِّب مرض القلب في الوقت الذي يُفترَض إحصائيًّا أن يكون الفرد في عداد الأموات، تتراكم في الجينوم. ففي البشر، لا يمكن أن يتخلص الانتقاء الطبيعي من جين يُسبِّب مرض ألزهايمر في سن ١٥٠ عامًا إذا لم يَعِشْ أحدٌ إلى هذه السن. وفي الأزمنة الماضية نجت الجينات التي تسبب مرض ألزهايمر عند سن السبعين لأنه لم يكن أحد يتجاوز سن السبعين إلا القليل. ومن ثم ينظر مدوَّر إلى سن الشيخوخة باعتبارها التدهور الناتج عن الجينات التي تستمر في أداء وظائفها في إنسان لا يزال على قيد الحياة وكان ينبغي أن يكون في قبره منذ زمن؛ فهي نتاج عمل جينات تُعَدُّ بالمئات، إن لم تكن بالآلاف، تُعتبَر ميتة من الناحية الفعلية، ومن ثم فهي خارج إطار الانتقاء الطبيعي. والبشر هم وحدهم الذين يعانون على طريقة أسطورة تيثونوس؛ لأنهم وحدهم الذين نجحوا بطرق اصطناعية في إطالة متوسط أعمارهم بتخلصهم من كثير من الأسباب الإحصائية للموت، مثل الحيوانات المفترسة وكثير من الأمراض المعدية الخطرة. لقد أخرجنا من القبور جينات ميتة، وها هي تتعقبنا حتى قبورنا.

نُقِّحَتْ أفكار مدوَّر على نحوٍ مستقل مِنْ قِبَل البيولوجي التطوري الأمريكي جورج سي ويليامز الذي اقترح فكرة أعطاها واحدة من أسوأ التسميات العلمية بالتأكيد؛ وهي: تعدد النمط الظاهر المتضاد. في رأيي، هذا المصطلح الغريب مستفز وسخيف. وفي الواقع هو يشير إلى أن الجينات لها تأثيرات عدة، بعضها أفضل من البعض الآخر، بل إن بعضها ضار بالفعل. ونذكر كمثال تقليدي ومؤسف على ذلك: داء هنتنجتون؛ وهو مرض تنكسي بدني وعقلي قاسٍ لا يرحم، ويبدأ باختلاجات عضلية طفيفة وتعثُّر عند المشي في فترة مبكرة من منتصف العمر، ولا يلبث أن يُجرِّد المريض من قدرته على المشي والكلام والتفكير والتعقُّل. تنتج هذه الحالة المرضية من «الجنون الترنحي» عن خلل في أحد الجينات، ولا يكشف هذا الخلل عن نفسه إلا بعد النضج الجنسي. وتقترح بعض الأدلة غير الحاسمة أن الأشخاص الذين يُصابون بداء هنتنجتون يتمتعون بكفاءة أكثر من الناحية الجنسية في مرحلة مبكرة من حياتهم، وإن كان سبب هذا غير معروف، ويُعَدُّ مبلغ هذا التأثير ضئيلًا للغاية. ولكن الفكرة هي أن الجين الذي يُحدث ولو قدرًا ضئيلًا من الكفاءة الجنسية يتم انتقاؤه ويبقى في الجينوم، وإن كان سيُسبِّب فيما بعد أشد الانحلالات العصبية فظاعة.

ليس من المعروف بشكل مؤكد عدد الجينات المرتبطة بالأمراض في مراحل العمر المتأخرة، ولكن الفكرة بسيطة إلى حدٍّ ما ومقبولة من الناحية التفسيرية. فمن السهل أن تتخيَّل جينًا ما يُسبِّب تراكمًا لعنصر الحديد باعتباره مفيدًا في مرحلة مبكرة من العمر؛ إذ يعمل، على سبيل المثال، على تكوين الصبغ الدموي المسمى بالهيموجلوبين، إلا أنه يكون ضارًّا فيما بعد؛ إذ إن زيادة تراكم الحديد بالجسم تُسبِّب السكتة القلبية. من المؤكد أنه لا تُوجَد فكرة تطورية أكثر تناغمًا مع الطب الحديث من هذه الفكرة. وفي الحديث الشائع بين الناس يُقال إن هناك جينًا لكل شيء، بدءًا من الشذوذ الجنسي وحتى مرض ألزهايمر. ولكن هذا كلام مستهلك، الهدف منه زيادة مبيعات الصحف والمجلات، بينما الحقيقة أعمق من هذا. والفكرة القائلة إن تنويعات جينية معينة تُحتِّم الإصابة بأمراض معينة راسخة في أعماق الأبحاث الطبية. ومن الأمثلة المعروفة لذلك أن هناك ثلاثة تنويعات مختلفة من الجين المسمى ApoE؛ وهي: ApoE2 وApoE3 وApoE4. لدى حوالي ٢٠ بالمائة من السكان في أوروبا الغربية النوع ApoE4، الذين لديهم هذا النوع الجيني، ويعرفون هذا الأمر، لا شك أنهم يتمنون لو كان الأمر خلاف ذلك؛ إذ إنه مرتبط بقابلية أعلى من الناحية الإحصائية للإصابة بمرض ألزهايمر، فضلًا عن أمراض

القلب والأوعية الدموية والسكتة الدماغية. فإذا كانت لديك نسختان من النوع ApoE4 فيجدر بك أن تحترس في أكلك وأن تمارس الرياضة بانتظام إذا أردت أن تتحاشى الإصابة بتلك الأمراض الجينية المدمرة.[٤]

ليس من المعروف «فائدة» الجين ApoE4، ولكن حقيقة شيوع هذا النوع الجيني تُوحي بأنه قد يكون مفيدًا لشيء ما في مرحلة مبكرة من العمر، بما يتوازى مع ما يتسبَّب فيه من مشكلات فيما بعد. ولكن هذا مجرد مثال واحد من مئات الأمثلة إن لم تكن الآلاف. وتعمل الأبحاث الطبية على تعقُّب تلك التنويعات الجينية ومحاولة تحييد آثارها الضارة من خلال عقاقير جديدة تستهدفها (وإن كانت غالية الثمن). وعلى العكس من داء هنتنجتون، فإن أغلب الأمراض المرتبطة بالتقدُّم في السن بمنزلة نسيج كثيف من العوامل الجينية والبيئية. وبصفة عامة، تسهم جينات متعددة في إحداث أضرار مرضية. ففي أمراض القلب والأوعية الدموية، على سبيل المثال، تُوجَد عوامل جينية مختلفة تُعرِّض الناس للإصابة بارتفاع ضغط الدم، أو سرعة تجلط الدم، أو السمنة، أو ارتفاع الكولسترول، أو الميل إلى الخمول. وإذا كانت قابلية الإصابة بارتفاع ضغط الدم مصحوبة بالتهام الأطعمة المتخمة بالدهون والملح، وتجرع الخمور وتدخين السجائر وتفضيل الاستلقاء في كسل أمام التليفزيون على ممارسة الرياضة، فلسنا بحاجة إلى شركة تأمين لِتُقَدِّر لنا خطورة الوضع. ولكن بصفة عامة، يُعَدُّ تقدير مدى قابلية الإصابة بالأمراض جهدًا لا يُقابَل بالشكر، ولا يزال فهمنا للقابلية الجينية للإصابة بأمراض معينة في مهده. وحتى عند جمع إسهامات العوامل الجينية في الإصابة بالأمراض المرتبطة بالتقدم في السن نجد أنها تُشكِّل عادةً أقل من ٥٠ بالمائة. فالشيخوخة المجردة — في حد ذاتها وفي جميع الحالات تقريبًا — تكون هي عامل الخطورة الرئيسي في هذا الصدد، وقليل فقط من سيِّئي الحظ هم مَنْ يقعون فريسة للسرطان أو يُعانون سكتة دماغية في العشرينيات أو الثلاثينيات من أعمارهم.

وبصفة عامة، إذن، المفهوم الطبي الحديث للأمراض المرتبطة بكبر السن يتوافق بشكل وثيق مع التصور التطوري لمدوَّر للجينات متأخرة التأثير. تسهم مئات عديدة من الجينات في زيادة استعدادنا للإصابة بالأمراض، ولدى كلٍّ منا طيف خاص به للإصابة بالأمراض، أي مقبرتنا المميزة من الجينات، التي يمكن أن تزداد تأثيراتها الضارة شدة أو تقل عن طريق نمط الحياة الخاص بكلٍّ منا، أو عن طريق الجينات الأخرى. ولكنَّ هناك مشكلتين خطيرتين فيما يختص بوجهة النظر هذه عن الشيخوخة.

تكمن أولاهما في انتقائي للألفاظ في هذا الصدد؛ فأنا أتحدَّث عن الأمراض، وتحديدًا عن «أعراض» الشيخوخة، وليس عن «السبب» الكامن وراء الشيخوخة. فتلك الجينات ترتبط بأمراض مُعيَّنة ولكن القليل منها فقط على ما يبدو هو الذي يُسبِّب الشيخوخة ذاتها. من الممكن أن يعيش الإنسان حتى عمر ١٢٠ عامًا، دون أن يعاني مرضًا ذا بال. ولكنه في النهاية يهرم ويقضي نَحْبَه. وبالنسبة لبقيتنا، فإن التأثيرات السلبية للجينات المعيبة يكشفها التقدُّم في السن؛ فلم تكن تزعجنا حينما كنا شبابًا، ولم تفعل هذا إلا حينما هرمنا. وهناك مَيْل في الطب للنظر إلى الأمراض المتعلقة بكبر السن باعتبارها أمراضًا باثولوجية عضوية (ومن ثم فهي «قابلة للعلاج»)، والنظر إلى كبر السن ذاته باعتباره «حالة» وليس مرضًا، ومن ثم فهو بطبيعته «غير قابل للعلاج». إن هناك رفضًا يمكن تفهمه لِوَصْم المسن باعتباره مريضًا. ومع أن وجهة النظر هذه ليست مفيدة، من حيث إنها تحاول فكَّ الاشتباك بين الشيخوخة والأمراض المتعلقة بها، فإن هذا التمييز يبلور فكرتي عن مدوَّر بشكل واضح. فقد فسَّرَ مدوَّر دور الجينات في الأمراض المتعلقة بالشيخوخة، ولكنه لم يُفَسِّر السبب من وراء الشيخوخة ذاتها.

ولقد أتى الدافع من وراء هذا التمييز كاكتشاف صادم في العقد التالي لعام ١٩٨٨، حينما اكتشف ديفيد فريدمان وتوم جونسون بجامعة كاليفورنيا، بمدينة إرفين أول حالة تطافر جيني مسببة لطول العمر في الديدان الخيطية (النيماتودا)؛ إذ أدَّتْ طفرات في الجين المسمى age-1 إلى مضاعفة عمرها الطبيعي من ٢٢ إلى ٤٦ يومًا. وعلى مدى الأعوام التالية تَمَّ تسجيل أرقام جديدة لطفرات مماثلة في النيماتودا، فضلًا عن صور أخرى متشعبة من الحياة، من فطر الخميرة إلى ذباب الفاكهة والفئران. ولفترة ما، ساد هذا المجال شعور يشبه الشعور الذي ساد مجال فيزياء الجسيمات في أوج ازدهاره في عقد السبعينيات، مع اكتشاف مجموعة متنوعة من الطفرات المطيلة للعمر وتصنيفها. وتدريجيًّا بدأ نمط معين في البروز. فلقد كانت كل الجينات الطافرة تقريبًا تشفر البروتينات بنفس المسار الكيميائي الحيوي، سواء في الخميرة أو الذباب أو الفئران. وبتعبير آخر نقول: كانت هناك آلية محفوظة بشكل استثنائي، تنطبق على الخميرة وعلى الثدييات على حد سواء، تتحكم في العمر. ولم تكن الطفرات الجينية في هذا المسار تطيل المدى العمري فحسب، بل كانت أثناء ذلك أيضًا تؤخِّر أعراض الشيخوخة، بل وتتجنَّبها. وخلافًا لأسطورة تيثونوس المسكين، فقد اقترنت مضاعفة العمر بتحسُّن مضاعف في الصحة.

لم تأتِ الرابطة بين المرض والعمر كمفاجأة. فعلى أي حال، جميع الثدييات تقريبًا تعاني طيفًا مشابهًا من الأمراض المتعلقة بكبر السن، بما فيها الداء السكري والسكتة الدماغية والأمراض القلبية الوعائية والعمى وعته الشيخوخة … إلخ. ومع ذلك، فإن الجرذ يقع فريسة للسرطان في عمر ثلاث سنوات تقريبًا حينما يشيخ، بينما يبدأ البشر في معاناة نفس الأمراض في سن الستين أو السبعين. ببساطة، حتى الأمراض الجينية ترتبط بالشيخوخة، وليس بالتوقيت الزمني نفسه. وإن ما جاء كمفاجأة حقيقية في مجال الطفرات الجينية المتعلقة بالعمر كانت مرونة المنظومة ككلٍّ؛ إذ يمكن أن تسبب طفرة واحدة في جين واحد فقط مضاعفة المدى العمري وفي الوقت ذاته «تعطِّل» أمراض الشيخوخة.

ولا حاجة بنا للتأكيد على أهمية هذه الاكتشافات للبشر. فكل أمراض الشيخوخة، من السرطان إلى أمراض القلب إلى مرض ألزهايمر، يمكن نظريًّا تأخيرها، بل وتجنُّبها بإجراء تعديلات بسيطة في مسار واحد. إنه استنتاج صادم، ومع هذا فهو ماثل أمام وجوهنا؛ إذ ينبغي أن يكون من الأسهل أن «نعالج» الشيخوخة وجميع الأمراض المتعلقة بها بعلاج طبي واحد شامل من أن نعالج أي واحد من تلك الأمراض، مثل ألزهايمر، في أناس توغَّلوا في الشيخوخة بالفعل. وهذا هو السبب الثاني في اعتقادي أن تفسير مدوَّر للشيخوخة خطأ. فنحن لسنا خاضعين تمامًا لمقبرة الجينات الخاصة بنا، بل يمكننا أن نتخطَّى جبانة الجينات تمامًا إذا تجنَّبنا الشيخوخة في المقام الأول. إن أمراض الشيخوخة تعتمد على «العمر البيولوجي» وليس الزمن المنقضي وحسب. فإذا عالجنا الشيخوخة نكون قد عالجنا أمراض الشيخوخة، كلها. والدرس الدامغ المستفاد من كل هذه الدراسات الجينية هو أن الشيخوخة قابلة للعلاج.

إن وجود مسار كيميائي حيوي يتحكم في المدى العمري يثير بضعة أسئلة في مجال التطور. أولى تبعات الأمر، وهو الأمر غير الصحيح، هو أن العمر مكتوب مباشرةً في الجينات؛ بمعنى أن الشيخوخة والموت مبرمجان، ويُفترَض أن هذا لصالح نوع الكائن ككلٍّ؛ وهو الافتراض الذي كان فايسمان أول من وضعه. ولكن إذا استطاعت طفرة جينية واحدة أن تضاعف المدى العمري، فلماذا لا نرى المزيد من «حالات الغش»، والمزيد من الحيوانات التي تخرج عن إطار النظام لمصلحتها؟ إن الأمر بسيط. فإذا كانت الحيوانات لا تغش، فلا بد أن هناك عقوبة للغش، عقوبة عنيفة بدرجة تكفي للتغلب على مزايا الحياة الأطول. وإذا كان هذا صحيحًا، فربما نفضِّل أن نحتفظ بأمراضنا.

هناك عيب بالفعل؛ وهو التكاثر الجنسي مجددًا. فإذا شئنا أن نطيل أعمارنا وأن نتجنَّب الأمراض، فمن الحكمة أن نقرأ الكلمات صغيرة الحروف في عقدنا المكتوب مع الموت. فمن العجيب أن الطفرات في جميع الجينات المتعلقة بطول العمر، التي تُسمَّى «جينات العمر»، تعمل على إطالة المدى العمري، وليس تقصيره. فالوضع الأساسي دائمًا هو أن يكون العمر قصيرًا. وهذا يكون منطقيًّا حينما نضع في اعتبارنا طبيعة المسار الكيميائي الحيوي الذي تتحكم فيه جينات العمر. إن الأمر لا يتعلَّق بالتقدُّم في العمر ذاته، ولكن بالنضج الجنسي. إن نمو حيوانٍ ما وصولًا إلى النضج الجنسي يتطلَّب وفرة في الموارد والطاقة، وإذا لم تكن هذه الموارد متاحة فمن الأفضل تأخير النمو الجنسي والتريث إلى حين توافر تلك المتطلبات. وهذا يعني أن الوفرة البيئية في حال وجودها، ينبغي ضبطها وتحويلها إلى عملة كيميائية حيوية تخاطب الخلايا مباشرةً قائلة لها: «هناك وفرة من الطعام، والوقت الحالي وقت مناسب لتستعدِّي للتكاثر. فلتتهيَّئي للتزاوج!»

إن الإشارة الكيميائية الحيوية التي تدل على الوفرة هي هرمون الأنسولين، فضلًا عن عائلة كبيرة من الهرمونات ذات الصلة التي تعمل على فترات أطول (لأسابيع أو شهور)، وأكثرها وضوحًا هو عامل النمو ذو الصلة بالأنسولين. لا تعنينا هنا أسماء هذه الهرمونات، وفي ديدان النيماتودا وحدها يُوجَد تسعة وثلاثون هرمونًا ذات صلة بالأنسولين. المهم أن الطعام حينما يكون وفيرًا، تنبري هرمونات الأنسولين لأداء مهامها، وتنظيم تشكيلة من التغيرات التطورية التي تهيئ الحيوان للتزاوج. وإذا لم يكن الطعام متاحًا تسكن أصوات هذه المسارات، ويتم إرجاء النمو الجنسي. إلا أن السكون لا يعني عدم حدوث شيء مطلقًا، بل على العكس، فإن غياب إشارة ما تكتشفه مستشعرات أخرى، وهذه بالتبعية تفرض قيودًا على أنشطة الحياة، وكأنها تقول للكائن الحي: انتظر واصبر حتى تتحسن الأحوال، ثم حاوِلْ مجددًا أن تتزاوج. وفي نفس الوقت يُحفَظ الجسم في حالة كمون أطول مدة ممكنة.

كان من طرح فكرة التوازن بين التزاوج وطول العمر إخصائي علم الشيخوخة البريطاني توم كيركوود في منتصف سبعينيات القرن العشرين، قبل اكتشاف أيٍّ من جينات العمر بوقتٍ طويل. ولقد تصوَّر كيركوود تمامًا وجود ذلك «الخيار» على الأسس الاقتصادية القائلة إن الطاقة محددة وإن كل شيء له ثمن وتكلفة. إن تكلفة الطاقة اللازمة للحفاظ على الجسم وصيانته يجب أن تُطرَح من تكلفة الطاقة اللازمة للتزاوج، والكائنات التي تحاول فعل الأمرين بنفس القدر في آنٍ واحد تكون أقل نجاحًا من

تلك التي توزِّع مواردها بالقسطاس. وأكثر الأمثلة الدالة على ذلك شدة وتطرفًا تلك الحيوانات التي لا تتكاثر سوى مرة واحدة ولا ترعى ذريتها مطلقًا، مثل سمك السالمون الباسيفيكي. فلا يُفسَّر نفوقها الجماعي الكارثي باعتباره برنامجًا للموت بقَدْر ما يُفسَّر على أنه استثمار إجمالي للموارد في مشروع لحفظ النوع؛ أي التكاثر.[٥] فهي تهلك في غضون أيام لأنها تخصِّص كل مواردها للتزاوج، وتسحب كل رصيدها من بند الصيانة الجسدية. ويتعيَّن على الحيوانات التي تتكاثر أكثر من مرة، في مناسبات مختلفة، أن تخصِّص قَدْرًا أقل من مواردها للتزاوج وقَدْرًا أكبر لصيانة أجسادها، وعلى الحيوانات التي تستثمر بكثافة في تربية ذريتها على مَرِّ السنين، مثل البشر، أن تضبط هذا التوازن أكثر وأكثر. ولكن في جميع الحالات هناك خيار. وهذا الخيار لدى الحيوانات يتم التحكم فيه مِنْ قِبَل هرمونات الإنسولين.

تعمل طفرات جينات العمر على إسكات هذه الجينات؛ إذ تعطل الإشارة الدالة على الوفرة، وبدلًا منها تستثير الجينات المختصة بالصيانة الجسدية. وحتى حينما يكون الطعام وفيرًا، تخفق جينات العمر الطافرة في الاستجابة. أولى المفارقات العديدة التي يتسبَّب فيها هذا الأمر هو أن هذه الطفرات تقاوم الإشارة القوية الدالة على وجود الإنسولين. ومكمن المفارقة هنا هو أن مقاومة الجسم للإنسولين في البشر لا تُسبِّب طول العمر وإنما تُسبِّب الداء السكري من النوع الثاني الذي يُصِيب الكبار. والمشكلة أن الإفراط في الأكل، إذا أُضِيفَ إليه وجود عزم فسيولوجي على اختزان الموارد الشحيحة لأوقات أفضل، يؤدي إلى زيادة الوزن والداء السكري والوفاة المبكرة. ثاني المفارقات أن العقوبة المفروضة مقابل إطالة الحياة، وهي تأجيل إمكانية التزاوج، تبقى مستمرة بإصرار. وهي تتجسَّد في صورة انعدام في الخصوبة. ومن ثم فليس مِنْ قَبِيل المصادفة أن ارتبط الداء السكري بانعدام الخصوبة. فالداء السكري وانعدام الخصوبة ينتجان عن التقلُّب الهرموني ذاته. ويمكن أن تؤدِّي إعاقة الإنسولين إلى إطالة الحياة فقط إذا بقينا جائعين معظم الوقت، على أن يكون ثمن ذلك عدم إنجاب أطفال مطلقًا.

بالطبع نعلم هذا لعقود من الزمان، وهذه هي المفارقة الثالثة. ربما لا تعجبنا هذه الحقيقة كثيرًا، ولكننا اكتشفنا منذ عشرينيات القرن العشرين أن الاعتدال في الأكل والجوع المعتدل لفترات معتدلة يساعد على إطالة العمر. وهذا ما يُسمَّى تقييد السعرات. فلقد تبيَّنَ أن الفئران إذا تمَّتْ تغذيتها بغذاء متوازن، ولكنه يقل في سعراته بنسبة ٤٠ بالمائة عن المعتاد، تعيش مدة أطول بمقدار النصف من أقربائها التي تغذَّتْ جيدًا، كما

تقل معاناتها من أمراض الشيخوخة. وهكذا، فإن الأمراض المتعلقة بالشيخوخة تتأجل إلى أجلٍ غير مسمى، كما يقل احتمال الإصابة بها. ليس مؤكدًا إن كان تقليل السعرات في البشر له نفس التأثيرات كما الحال في الفئران، ولكن هناك من العلامات ما يفيد بهذا، وإن كان بدرجة أقل قليلًا؛ إذ تشير دراسات كيميائية حيوية إلى احتمال حدوث تغيُّرات مماثلة في البشر أيضًا إلى حدٍّ بعيد. ولكن بالرغم من الحقيقة القائلة إننا نعرف تأثيرات تقييد السعرات على مدى عقود، فإننا لا نعرف إلا القليل عن كيفية حدوث هذا وسببه، أو حتى ما إذا كان هذا ينطبق على البشر بشكل مؤكد.

وثمة سبب لهذه المشكلة، وهو أن إجراء دراسة سليمة علميًّا على الفترة التي يعيشها الإنسان يستغرق عقودًا عدة؛ مما يقوِّض حماس الباحثين، حتى أكثرهم اهتمامًا.[٦] وهناك سبب آخر وهو المفهوم السائد منذ زمنٍ طويل بأن المدى العمري الأطول يعني الحياة بوتيرة أشد بطئًا وأكثر إثارة للضجر. لكن الواقع يقول إن هذا غير صحيح، ويمنحنا سببًا للأمل والتفاؤل. إن تقييد السعرات يُحسِّن كفاءة استخدام الطاقة دون خفض مستويات الطاقة ككلٍّ، بل على العكس في واقع الأمر، فإنه يميل إلى رفعها. إلا أن السبب الرئيسي لقلة ما نعرفه في هذا الصدد هو أن الكيمياء الحيوية التي تكتنف تقييد السعرات تشكِّل شبكة رهيبة من التلافيف المرتدة والدوائر المتوازية والبيانات المتكررة التي تتفاوت بشدة من نسيجٍ إلى آخر ومن نوعٍ إلى آخر وتقاوم إماطة اللثام عنها. وتكمن أهمية جينات العمر في أنها تظهر أن حدوث تغيرات طفيفة في تلك الشبكة المعقدة يمكن أن يصنع فارقًا كبيرًا. فلا غرو إن كان للمعرفة تأثير مثير لحماس الباحثين.

من المفترض أن تقييد السعرات يُظهر تأثيراته جزئيًّا على الأقل، من خلال المسارات التي تتحكَّم فيها جينات العمر. إنه مفتاح تحويلة يختار بين بديلين؛ فإما التزاوج وإما طول العمر. وثمة مشكلة في تقييد السعرات وهي أنه يشدد بإصرارٍ كامل على هذا التخيير أو هذه المفاضلة؛ ومن ثَمَّ يقل احتمال أن يحصل المرء على ميزة التزاوج كإضافة إلى طول العمر. ولكن هذا لا ينطبق على جينات العمر في جميع الأحوال، فبعض الطفرات في جينات العمر تثبط النضج الجنسي (وهذا تفعِّله الطفرة الأصلية في جين age-1 بنسبة ٧٥ بالمائة، على سبيل المثال) ولكن ليست كلها تفعل هذا. ولقد ثبت أن هناك بضعة من جينات العمر التي تساعد على إطالة العمر وتعزيز الصحة معًا، مع القليل من التثبيط للقدرة الجنسية؛ يتخذ صورة تأجيل طفيف وليس منعًا نهائيًّا. وهناك جينات أخرى تُوقِف النمو الجنسي في الحيوانات صغيرة السن، ولكن ليست لها

آثار سلبية واضحة في الحيوانات البالغة الأكبر سنًّا. ومرة أخرى أقول إن التفاصيل لا تهمنا هنا، والمهم أن من الممكن بشيءٍ من البراعة فض الاشتباك بين التكاثر الجنسي وطول العمر، بتنشيط الجينات المسئولة عن طول العمر دون الإضرار بالقدرة الجنسية.

ثمة اثنان من جينات العمر يبدو أنهما يلعبان دورًا أساسيًّا في تقييد السعرات، وقد برزا ودخلا في دائرة الاهتمام على مدى السنوات القليلة الماضية، ويُسمَّيان SIRT-1 وTOR. وهما واسعا الانتشار بين الكائنات لدرجة تكاد تكون شاملة؛ من فطر الخميرة حتى الثدييات، وكلاهما يمارس تأثيراته على العمر عن طريق تنشيط مجموعات كاملة من البروتينات، وكلاهما حساس لوجود أو غياب المواد الغذائية وعوامل النمو مثل عائلة الأنسولين، وينشط في العمل في أحوال متعاكسة.[٧] من المعتقد أن جين TOR يتحكَّم في الجانب الجنسي من مفتاح التحويلة، الذي ذكرناه سابقًا، عن طريق تنشيط النمو والتكاثر الخلويين. وهو يعمل عن طريق تنشيط بروتينات أخرى؛ مما يؤدي إلى تحفيز عملية بناء البروتينات والنمو الخلوي، بينما يعيق تحلل المكونات الخلوية وتقلُّبها. وفي نفس الوقت يعوق جين SIRT-1 الكثير من هذه التأثيرات، بينما ينشئ «استجابة توترية» لدعم الخلية. وعلى نحوٍ معتاد في العالم البيولوجي فإن أنشطة هذين الجينين تكون متداخلة وليست متعارضة. ولكن هذين الجينين فيما بينهما يعملان عمل «المحاور» الأساسية المسئولة عن تنسيق الكثير من فوائد تقييد السعرات.

وقد قفز جينا SIRT-1 وTOR إلى دائرة الضوء جزئيًّا لأنهما مهمان حقًّا، وجزئيًّا لأننا نعلم بالفعل كيف نستهدفهما من الناحية الدوائية، وقد أدَّى هذا — إضافة إلى الفوائد التي على المحك — إلى إثارة جدل علمي قوي. فوفقًا لليونارد جوارنتي، بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وديفيد سنكلير، الباحث السابق في مرحلة ما بعد الدكتوراه، الذي صار الآن في جامعة هارفرد، فإن جين SIRT-1 مسئول عن معظم تأثيرات تقييد السعرات في الثدييات ويمكن تنشيطه بجزيء صغير من مادة تُوجَد في النبيذ الأحمر تُعرَف بالرسفيراترول. وقد أظهرت سلسلة من المطبوعات عالية القيمة، بدءًا من مجلة «نيتشر»، التي نُشِرَتْ فيها ورقة بحثية عن هذا الأمر في عام ٢٠٠٣، أن الرسفيراترول يمكن أن يساعد على زيادة المدى العمري لفطر الخميرة والديدان والذباب. وقد تفجَّرَ اهتمام شعبي في نوفمبر ٢٠٠٦ حينما نشر سنكلير وزملاؤه بحثًا واعدًا في مجلة «نيتشر»، يُظهِر أن الرسفيراترول يُقلِّل قابلية نفوق الفئران السمينة بمقدار الثلث، وقد نُشِرَ هذا الاكتشاف بالصفحة الأولى من جريدة «نيويورك تايمز»؛ مما زاد من رواج هذا الأمر بين

الناس. فإذا كان بإمكان هذه المادة أن تُحقِّق هذا للفئران السمينة، فبإمكانها أن تفعل الأعاجيب للبشر أيضًا. وقد أضافت الفوائد الصحية المعروفة لاحتساء النبيذ الأحمر المزيد من الحنطة إلى المطحنة، مع أن كمية مادة الرسفيراترول في كوبٍ واحد من النبيذ الأحمر لا تزيد عن ٠٫٣ بالمائة من كل جرعة أُعْطِيَتْ للفئران.

ومن قبيل المفارقة أن اثنين من طلبة الدكتوراه السابقين في معمل جوارنتي، وهما بريان كنيدي ومات كيبرلاين — وكلاهما صارا الآن أستاذين بجامعة واشنطن، بمدينة سياتل — عارضا هذه الفكرة الأنيقة مؤخرًا. ولكونهما من روَّاد بعض الأبحاث المبكرة التي أُجْرِيَتْ على الجين SIRT-1، فقد انزعجا لما وجداه من استثناءات تخالف ما تنبأ به من قبل.

يناصر كيبرلاين وكنيدي الجين TOR وليس الجين SIRT-1، وهما يقولان إن تأثيراته أكثر انتشارًا ورسوخًا بين أنواع الكائنات. ونظرًا لأن الجينين TOR وSIRT-1 يتصفان بخصائص متراكبة وليست متضادة تمامًا، فقد يكون العالمان على حق. وقد اكتشفا أن كبح الجين TOR يثبِّط النشاطين المناعي والالتهابي، مما قد يكون مفيدًا؛ لأن معظم الأمراض المتعلقة بالشيخوخة لها مكون التهابي مزمن. ثمة مفارقة ثانية هنا؛ وهي أن اللفظ TOR هو اختصار بالإنجليزية لعبارة target of rapamycin التي معناها «هدف الرابامايسين»، والرابامايسين عقار اكتُشِفَ في سياق طب زراعة الأعضاء. وهو يُعَدُّ واحدًا من أنجح العقاقير المثبطة للمناعة والمتداولة في هذا الحقل الطبي في سوق العقاقير، وقد استُعمِل على مدى أكثر من عقد من الزمان. ويتسم الرابامايسين بميزة غير عادية بين مثبطات المناعة في أنه لا يجعل مستعمليه عرضة للسرطان، أو هشاشة العظام؛ لكن لم يقتنع سوى قلة من الباحثين بدعم ميخائيل بلاجوسكلوني القوي لاستخدام الرابامايسين بوصفه عقارًا مضادًّا للشيخوخة. سيكون من المشوق دون شك أن نعرف ما إذا كان المرضى من ذوي الأعضاء المزروعة الذين يتناولون عقار الرابامايسين تقل إصابتهم بأمراض الشيخوخة أم لا.

ولكن تُوجَد مشكلة أعمق فيما يتعلق بكلٍّ من الرسفيراترول والرابامايسين بوصفها أدوية مضادة للشيخوخة، وهي مدى اتساع تأثيرهما هذا. فكلاهما ينسِّق عملية تنشيط أو تثبيط عشرات، بل مئات، البروتينات والجينات. وقد يكون هذا ضروريًّا إلى حدٍّ ما، إلا أن بعض أجزاء هذه المجموعة من التغيرات قد تكون غير مفيدة أو قد تكون ضرورية فقط في سياق الحرمان قصير المدى من الطعام أو الضغوط التوترية، وهو السياق الذي

برز فيه هذان العقاران. فلقد وجدنا، على سبيل المثال، أن تنشيط الجين SIRT-1 أو تثبيط الجين TOR يمكن أن يتسبَّب بوضوح في حدوث مقاومة للإنسولين، والإصابة بالداء السكري، وعدم الإنجاب، وتثبيط المناعة. ومن المفضَّل اتباع أسلوب أكثر استهدافًا لا يتضمَّن التضحية إلا بالقليل من فوائد الجينين.[٨] ونعرف أن هذا ينبغي أن يكون ممكنًا؛ لأن الحيوانات التي تطول أعمارها عن طريق الانتقاء الطبيعي على مدى أجيال تعيش في البرية لا تعاني أيًّا من تلك العيوب المذكورة. وهنا تبرز تساؤلات هي: من بين خليط الجينات الذي يتأثر بجينَيْ SIRT-1 وTOR، أيها مسئول عن طول العمر والحد من الأمراض؟ وما هي بالتحديد التغيرات الفيزيائية التي تحدث داخل الخلايا وتوقف أضرار التقدم في السن؟ وهل يمكننا استهدافها مباشرةً؟

لم نتوصل إلى الإجابة عن هذه التساؤلات بصفة مؤكدة حتى الآن، وكما يحدث غالبًا، فيبدو أنه يُوجَد عدد من الإجابات يضاهي عدد الباحثين. بعض أولئك الباحثين يركز على أهمية وجود «استجابة توترية» واقية، بينما يركز البعض الآخر على التنظيم الفعال للإنزيمات المزيلة للسموم، ويركز البعض الثالث على أهمية تعزيز منظومة التخلص من نفايات الجسم. وقد تكون كل وجهات النظر تلك مهمة في بعض الظروف، ولكن يبدو أن أهميتها تتفاوت بين أنواع الكائنات المختلفة. والتغير الوحيد الذي يبدو أنه راسخ ومستقر بين الكائنات من الفطريات إلى الحيوانات، ومن بينها الإنسان، يتعلق بمحطات توليد الطاقة داخل الخلية: الميتوكوندريا. فتقييد السعرات يستحث في جميع الحالات تقريبًا المزيد من الميتوكوندريا، التي تتميز أغشيتها بمقاومة التلف، والتي يقل ما يتسرب منها من نواتج أيضية من «الجذور الحرة» المتفاعلة أثناء عملية التنفس. ولا تتميَّز هذه التغيرات بالثبات والرسوخ فحسب، بل إنها تنسجم أيضًا مع الأبحاث التي أُجْرِيَتْ على مدى نصف قرن عن العلاقة بين الجذور الحرة والشيخوخة.

تعود الفكرة القائلة إن الجذور الحرة قد تُسبِّب الشيخوخة إلى خمسينيات القرن العشرين؛ حيث افترض دنهام هارمان، الذي كانت لديه خلفية عن كيمياء الجذور الحرة في صناعة الزيوت، أن دقائق الأكسجين أو النيتروجين المتفاعلة تلك (التي فقدت إلكترونًا أو اكتسبته) قد تهاجم أيضًا جزيئات بيولوجية مهمة مثل الدي إن إيه والبروتينات. كما افترض هارمان أنها قد تؤدي في نهاية الأمر إلى تراكم النفايات في الخلايا ودفع عملية الشيخوخة قدمًا.

تغيرت أمور كثيرة خلال نصف القرن الذي تلى تقديم هارمان لفكرته الأصلية، ومن العدل الآن أن نقول إن هذه النظرية، على النحو الذي صِيغَتْ به في البداية، خطأ. وإن كان يمكن لنسخة مُعدَّلة منها أن تكون صوابًا.

فهناك شيئان لم يعرفهما هارمان، ولم يستطع معرفتهما. أولهما أن الجذور الحرة ليست مجرد دقائق متفاعلة، ولكن تستخدمها الخلايا لتحسين عملية التنفس، وأيضًا كإشارة خطر. فهي تعمل مثل الدخان الذي يحث على دق جرس الحريق. فالجذور الحرة لا تهاجم البروتينات والدي إن إيه عشوائيًّا، ولكنها تنشط أو تثبط عددًا قليلًا من البروتينات التحذيرية الأساسية (بما فيها الجين TOR ذاته)، التي بدورها تنظم نشاط المئات من البروتينات والجينات. وإننا نعرف الآن أن إشارات الجذور الحرة هي شيء أساسي للفسيولوجيا الخلوية؛ ومن ثم يمكننا أن نبدأ في إدراك السبب في أن مضادات الأكسدة (التي تزيل الجذور الحرة) تضر بقدر ما تنفع. ومع ذلك ما زلنا نجد الكثيرين ممن يتبعون توقعات هارمان الأصلية التي تجزم بأن مضادات الأكسدة تبطئ زحف الشيخوخة وتقي من الأمراض. ولقد أثبتت الدراسات الإكلينيكية المتكررة أنها لا تنفع في هذا الصدد. وسبب هذا أن مضادات الأكسدة تمنع إشارات التحذير التي تصدرها الجذور الحرة. وعلى هذا فإن التخلص من إشارات الجذور الحرة يشبه تعطيل جرس الإنذار ضد الحريق. ولمنع حدوث هذا يعمل الجسم على التحكم بدقة في مستويات مضادات الأكسدة في الدم في حدود صارمة. فإذا تناول المرء جرعات عالية من مضادات الأكسدة فإن الزائد منها يخرجه الجسم أو لا يتم امتصاصه أصلًا. ومن ثمَّ تبقى مستويات مضادات الأكسدة في الجسم متوازنة وثابتة تقريبًا، فيبقى جرس الإنذار مستعدًّا للعمل.

أما العامل الثاني الذي لم يعرفه هارمان (لأنه لم يتم اكتشافه إلا بعد زمن هارمان بخمس وعشرين عامًا) فهو الموت المبرمج للخلايا. ففي معظم الخلايا لا يزال الموت المبرمج يتم تنسيقه مِنْ قِبَل الميتوكوندريا، التي نقلت المنظومة كلها إلى الخلايا حقيقية النوى منذ مليارَيْ عام. ومن الإشارات الرئيسية التي توجِّه الخلايا للموت زيادة تسرب الجذور الحرة من الميتوكوندريا. واستجابة لإشارة الجذور الحرة هذه، تشغِّل الخلية جهاز الموت الذي لديها وتنسحب في صمت من إطار الحياة، وتختفي جميع الآثار الدالة على وجودها في السابق. فبدلًا من التراكم المميز لحطام الجزيئات الذي تُصوِّره هارمان، فإن آلة الموت الصامتة تعمل باستمرار على التخلص من الأدلة، بدرجة من الكفاءة تماثل جهاز الاستخبارات السوفييتي. وبهذا فإن اثنين من التوقعات الأساسية لنظرية هارمان

— أن التلف الجزيئي يتراكم حتى مستويات كارثية مع التقدم في السن، وأن مضادات الأكسدة لا بد أنها تبطئ هذا التراكم ومن ثم تعمل على إطالة العمر — قد تبيَّن خطؤهما ببساطة.

ولكن تُوجَد أسباب عدة تجعلنا نعتقد أنه يمكن لنسخة أكثر دقة من هذه النظرية أن تكون صحيحة بصورة عامة، وإن كانت لا تزال ثمة تفاصيل تحتاج لإبرازها. أول هذه الأسباب، وأهمها، هو حقيقة أن العمر يتفاوت وفق تفاوت تسرب الجذور الحرة في جميع أنواع الكائنات تقريبًا.[٩] فكلما كان التسرب أسرع كان العمر أقصر. وبصفة عامة يعتمد معدل تسرب الجذور الحرة على معدل الأيض؛ أي على معدل استهلاك الخلايا للأكسجين. فالحيوانات الصغيرة لديها معدلات أيض سريعة؛ إذ تستهلك خلاياها الأكسجين بأسرع ما يمكنها، وتنبض قلوبها بمئات الدقات في الدقيقة حتى أثناء راحتها. وبهذا التنفُّس السريع يكون تسرب الجذور الحرة عاليًا، وينفلت العمر سريعًا. وعلى العكس من هذا يكون للحيوانات الأكبر حجمًا معدل أيض أبطأ، ويظهر هذا في بطء دقات القلب وبطء تسرب الجذور الحرة، فتعيش أطول.

والاستثناءات هنا تثبت القاعدة بالفعل. فكثير من الطيور، على سبيل المثال، تعيش أطول بكثير مما يُتوقَّع لها على أساس معدلات أيضها. فالحمامة مثلًا تعيش حوالي خمس وثلاثين سنة؛ أي أطول مما يعيشه الجرذ بعشرة أضعاف، بالرغم من حقيقة أن الحمام والجرذان متماثلان في الحجم، ومتماثلان في معدل الأيض. وقد أجرى العالم الفسيولوجي الإسباني جوستافو بارخا في جامعة كمبلوتنسي بمدريد سلسلة رائعة من التجارب خلال تسعينيات القرن العشرين، أظهرت أن هذه الفروق يمكن أن تُعزى بدرجة كبيرة إلى تسرُّب الجذور الحرة. فتسرُّب الجذور الحرة لدى الطيور يقل بمقدار عشرة أضعاف تقريبًا عن نظائرها من الثدييات عند مقارنة ذلك بمعدل استهلاكها للأكسجين. وينطبق الأمر عينه على الخفافيش، التي تطول أعمارها أيضًا بدرجة لا تتناسب مع أحجامها. فالخفافيش تشبه الطيور في أن تسرب الجذور الحرة من الميتوكوندريا لديها يكون أقل بكثير. والسبب في هذا غير معروف على وجه اليقين، وإن كنت افترضت في كتب سابقة أن السبب يتعلَّق بالقدرة على الطيران. ولكن أيًّا كان السبب فإن الحقيقة التي لا مراء فيها أن انخفاض تسرُّب الجذور الحرة يعني طول العمر، أيًّا كان معدل الأيض.

وليس المدى العمري وحده هو الذي يتفاوت حسب تسرب الجذور الحرة، بل المدى الصحي كذلك. أوردنا سابقًا أن حدوث أمراض الشيخوخة لا يعتمد على الزمن المنقضي

في حدٍّ ذاته، وإنما على العمر البيولوجي. فالجرذان والبشر يعانيان نفس الأمراض، ولكنها تبدأ لدى الجرذان خلال سنتين فقط، بينما تستغرق لدى البشر عقودًا عديدة. وتنتج بعض الأمراض التنكسية عن نفس الطفرات الجينية تمامًا في كلٍّ من الجرذان والبشر، ولكننا نجد دائمًا نفس الفروق الزمنية؛ إذ يسقط القناع عن الجينات المعيبة، التي اعتبرها مدوَّر مرتبطة بالشيخوخة والتي تقع في قلب البحوث الطبية، في الحيوانات المسنة نتيجةً لأمرٍ ما يتعلَّق بحالة خلاياها المسنة. ولقد أظهر آلان رايت وزملاؤه بجامعة إدنبرة أن هذا الأمر يرتبط بمعدل تسرُّب الجذور الحرة. فإذا كان هذا التسرُّب سريعًا فإن الأمراض التنكسية تنشب أظفارها سريعًا، وإذا كان بطيئًا فإن تلك الأمراض تتأجل، وقد تختفي تمامًا. فالطيور، على سبيل المثال، تعاني القليل من أمراض الشيخوخة الشائعة في معظم الثدييات (باستثناء الخفافيش كما ذكرنا). وهناك فرضية معقولة تقول إن تسرُّب الجذور الحرة في نهاية الأمر يُغَيِّر حالة الخلايا فيجعلها «تشيخ»، وإن هذه الحالة المتغيرة تميط اللثام عن الآثار السلبية للجينات متأخرة النشاط.

فكيف تُغَيِّر الجذور الحرة حالة الخلايا أثناء الشيخوخة؟ يحدث هذا بشكل مؤكد تقريبًا من خلال التأثيرات غير المقصودة للإشارات التي ذكرناها. فاستخدام إشارات الجذور الحرة يكون خيرًا وبركة على الصحة حينما نكون صغار السن، ولكنَّ له آثارًا ضارة حينما نتقدَّم في السن (حسب نظرية تعدُّد النمط الظاهر المتضاد لجورج سي ويليامز). فحينما تبدأ مجموعات الميتوكوندريا في الخلايا في البلى والانحلال يبدأ تسرب الجذور الحرة في التزايد ولو ببطء شديد إلى أن يَصِل إلى الحدِّ الذي يحدث عنده إطلاق لجرس الحريق باستمرار. يحدث تنشيط لمئات الجينات في محاولة عقيمة لاستعادة الأوضاع السليمة؛ مما يؤدِّي إلى الالتهابات المزمنة، وإن كانت طفيفة، التي تُميِّز الكثير من أمراض الشيخوخة.[١٠] فهذه الالتهابات الطفيفة المزمنة تُغَيِّر خصائص الكثير من البروتينات والجينات الأخرى، مخضعة الخلايا لتوترات أكبر وأشد. وأظن أن حالة الالتهاب المزمنة تلك هي التي تميط اللثام عن الآثار الضارة للجينات متأخرة النشاط مثل ApoE4.

وهناك وسيلتان فقط للخروج من هذا الموقف. فإما أن تتأقلم الخلايا مع الحالة التوترية المزمنة أو لا تستطيع ذلك. وتتفاوت أنماط الخلايا المختلفة في قدرتها على التأقلم، وهذا يعتمد بدرجة كبيرة على «مهمتها» المنوطة بها. وأفضل مثال أعرفه في هذا الصدد يأتي من بحثٍ أجراه عالم رائد في علم العقاقير، ويُدعى سلفادور مونكادا، بكلية

لندن الجامعية. إذ أظهر مونكادا أن الخلايا العصبية وخلاياها الداعمة التي تُسمَّى الخلايا النجمية، لهما مصيران متناقضان تمامًا؛ إذ تعتمد الخلايا العصبية على ما لديها من الميتوكوندريا. وإذا لم تستطع أن تُولِّد ما يكفي من الطاقة للوفاء باحتياجاتها فإن آلة الموت الخلوية يتم تنشيطها فينقضي أَجَل الخلية العصبية في صمت. وجدير بالذكر أن المخ يكون قد انكمش حجمه بمقدار الربع في وقت ظهور الأعراض المبكرة لمرض ألزهايمر. وعلى العكس من هذا فإن الخلايا النجمية يمكنها البقاء حية وسالمة دون الميتوكوندريا؛ فهي تتحوَّل نحو مصادر بديلة للطاقة (وهو ما يُسمَّى «التحويل الحالُّ للسكر») فتصير منيعة على الموت الخلوي المبرمج. وهذان المصيران المتناقضان يُفسِّران سبب ارتباط كلٍّ من الأمراض التنكسية والسرطان بالشيخوخة. فإذا لم تستطع الخلايا أن تشغل مفتاح التحويلة نحو الطاقة البديلة فإنها تموت؛ مما يُسبِّب الأمراض التنكسية فتنكمش الأنسجة والأعضاء، ملقية المزيد من العبء على الخلايا القليلة المتبقية. ومن الناحية الأخرى، فإن الخلايا التي لديها إمكانية التحوُّل المذكورة تفعل هذا فتصير منيعة على الموت الخلوي. وهذه الخلايا تتأثر بالحالات الالتهابية المزمنة التي تجعلها تتكاثر، وسرعان ما تتراكم فيها الطفرات الجينية التي تُحرِّرها من القيود الطبيعية للدورة الخلوية فتتحول إلى خلايا سرطانية. ليس من قبيل المصادفة إذن أن الخلايا العصبية نادرًا ما تكوِّن أورامًا (أو لا تكوِّنها على الإطلاق) بينما تتكوَّن معظم أورام المخ من الخلايا النجمية.[11]

من هذا المنطلق يمكننا أن نفهم السبب في أن تقييد السعرات يحمي الجسم من أمراض الشيخوخة، على الأقل إذا بدأ ذلك في وقتٍ مبكر من الحياة بقدرٍ كافٍ (قبل أن تبلى الميتوكوندريا، ولا بأس في أن يكون هذا في منتصف العمر). فعن طريق خفض تسرُّب الجذور الحرة ودعم أغشية الميتوكوندريا ضد التلف وزيادة أعداد الميتوكوندريا يعمل تقييد السعرات بكفاءة على «إعادة ضبط» ساعة الحياة وإعادتها إلى الوراء؛ إلى مرحلة «الشباب». وأثناء فعله هذا فإنه يكبح عمل مئات من الجينات المسببة للالتهابات، مُعِيدًا إياها إلى بيئتها الكيميائية الشابة، بينما يدعم الخلايا ضد الموت الخلوي المبرمج. وهذه الأمور مجتمعة تثبط كلًّا من السرطان والأمراض التنكسية وتبطئ معدلات الشيخوخة. ومن المرجح، من الناحية العملية، أن تدخل عوامل أخرى (مثل التأثيرات المباشرة المثبطة للمناعة الناتجة عن تثبيط الجين TOR)، ولكن بصفة أساسية فإن معظم فوائد تقييد السعرات يمكن أن تُعزَى ببساطة إلى انخفاض تسرُّب الجذور الحرة. وهذا يجعلنا أشبه بالطيور.

ثمة دليل مثير للاهتمام يؤكِّد أن هذه هي الكيفية التي يسير بها الأمر. ففي عام ١٩٩٨ فحص ماساشي تاناكا وزملاؤه، الذين كانوا حينها بمعهد جيفو الدولي للتكنولوجيا الحيوية في اليابان، مصير أشخاص يتميزون بوجود نسخة متغيرة شائعة من الدي إن إيه الخاص بالميتوكوندريا (وهذا أمر شائع في اليابان على الأقل لكنه ليس شائعًا، لسوء الحظ، في الأماكن الأخرى من العالم). وهذه النسخة تُغيِّر حرفًا واحدًا فقط من الدي إن إيه. ويتمثَّل تأثير هذا التغيير في حدوث خفض ضئيل في تسرب الجذور الحرة، يتعذَّر رصده في أي لحظة منفردة بعينها، ولكنه يستمر طوال العمر. ولهذا الأمر تبعات هائلة. حدَّد تاناكا وزملاؤه حينئذٍ تسلسلات الدي إن إيه الميتوكوندري لدى مئات عدة من المرضى الذين وصلوا متتابعين إلى المستشفى، ووجدوا أنه تحت سن الخمسين عامًا تقريبًا لم يكن ثمة فارق في النسبة بين مجموعتَي الأفراد الذين لديهم نسخة الدي إن إيه المتغيرة محل الدراسة ومن يملكون النسخة «العادية». ولكن بعد سن الخمسين بدأت تنفتح فجوة بين المجموعتين من المرضى وتتسع. وعند سن الثمانين، كان لدى المرضى المتمتعين بوجود تلك النسخة نصف قابلية الإصابة بحالة من أي نوع تستدعي إدخالهم المستشفى. ولم يكن السبب في عدم إدخالهم المستشفى هو أنهم يكونون موتى بحلول هذا السن، وإنما وجد تاناكا أن اليابانيين الذين لديهم تلك النسخة تكون لديهم قابلية بمقدار الضعف للعيش حتى سن المائة عام. وهذا يفترض أن أولئك الأشخاص تقل — بمقدار النصف — قابلية معاناتهم لأي مرض من أمراض الشيخوخة. دَعْني أكرِّر قولي هذا؛ لأنني لا أعرف أي حقيقة أخرى تثير الدهشة في عالم الطب كله أكثر من هذه الحقيقة: إن مجرد تغيُّر ضئيل في الميتوكوندريا يقلِّل احتمال اضطرار المرء لدخول المستشفى لعلاجه من أي مرض من أمراض الشيخوخة إلى النصف، كما يضاعف احتمالات العيش حتى سن المائة. فإذا كنا جادِّين بشأن مواجهة المشكلات الصحية المزعجة والمعوقة للإنسان في مرحلة الشيخوخة على كوكبنا الأرضي المسن، فهذه بالتأكيد هي النقطة التي يجب أن نبدأ منها. ولنرفع عقيرتنا بهذا!

لا أريد أن أهوِّن من شأن التحديات العلمية التي تنتظرنا أو أقلِّل من قيمة جهود الباحثين الذين كرَّسوا حياتهم كلها في دراسة دقائق أمراض محددة من أمراض الشيخوخة. فبغير نجاحهم البطولي في توضيح علم الوراثة والجينات الوراثية والآليات الكيميائية الحيوية للأمراض لم يكن البناء على هذا الأساس بالأمر الممكن. ومع ذلك، فهناك خطر أن يكون

الباحثون الطبيون إما غير مدركين لأهمية التفكير التطوري، أو غير مهتمين بذلك. فإذا كان كل شيء في علم الأحياء لا يحمل معنى إلا في ضوء التطور، على حد قول المفكر التطوري ثيودور دوبجانسكي، فإن الطب بغير هذا العلم سيكون في حال أسوأ؛ ولن يكون للنظرة الحديثة إلى الأمراض أي معنى مطلقًا. فنحن نعرف ثمن كل شيء، لكننا لا نعرف قيمة أي شيء. وقد اعتاد جيل أجدادي أن يعزُّوا أنفسهم قائلين إن هذه الأمور أُنْزِلَتْ علينا لاختبارنا، ولكن مع اختفاء هذه النظرة الحتمية، صار المرض الآن يحدث بفعل الصدفة وحسب، ويحصد الأرواح بدرجة مأسوية كارثية. إننا الآن في «معركة» ضد السرطان وضد ألزهايمر، معركة نعرف أننا سنخسرها يومًا ما.

ولكن الموت والمرض ليسا شيئين عشوائيين، بل إن لهما معنى. وبإمكاننا أن نستغل هذا المعنى في علاج أنفسنا. لقد نشأ الموت وتطوَّرَ، وكذلك الشيخوخة. ولقد نشآ وتطوَّرا لأسباب نفعية. وبصفة عامة يمكن القول إن الشيخوخة شيء مَرِن، وإنها متغيِّر تطوريٌّ وُضِعَ لِيُضاد عوامل أخرى مختلفة — مثل النضج الجنسي — في الكتاب الأساسي للحياة. وهناك عقوبات ضد العبث بهذه المعايير، ولكن تلك العقوبات تتفاوت ويمكن في حالات قليلة أن تكون طفيفة على أقل تقدير. ونظريًّا، يمكن لعمليات ضبط صغيرة لمسارات مُعيَّنة أن تمكننا من أن نعيش فترات أطول وأكثر صحة. ودَعْني أضع هذا المفهوم في صيغة أقوى: تفترض نظرية التطور أن بإمكاننا أن نستأصل أمراض الشيخوخة بدواء واحد عام محكم وفعَّال. إن الحبة المضادة للشيخوخة ليست خرافة.

ولكنني أظن أن «علاج» مرض ألزهايمر خرافة. في واقع الأمر، إن الباحثين الطبيِّين لا يَمِيلون كثيرًا لكلمة «يعالج»، ويُفضِّلون بدلًا منها ألفاظًا أكثر حذرًا، مثل «يخفِّف» أو «يلطِّف» أو «يؤخِّر». وأشك في أننا سنتمكن يومًا من علاج مرض ألزهايمر لدى أناس قد صاروا مسنين؛ لأننا بهذا نتجاهل شروط الصفقة التطورية. إن الأمر يشبه محاولة ترقيع بعض الشقوق في سدٍّ يتسرَّب منه الماء بقليل من الملاط آملين في إيقاف تدفُّق المياه. وينطبق هذا أيضًا على أمراض؛ مثل: السكتة الدماغية، وأمراض القلب، وصور كثيرة من السرطان ... وغيرها. لقد أَمَطْنا اللثام عن قَدْر كبير للغاية من التفاصيل. فنحن نعرف ما يحدث في كل بروتين، وفي كل جين، إلا أننا نجهل الصورة الكاملة. فالأمراض المذكورة تُصِيب أجساد العجائز، وهي نتاج لبيئة داخلية مسنة. وإذا تدخلنا في مرحلة مبكرة من الحياة؛ فبإمكاننا أن نُعِيد ضبط تلك البيئة المسنة لتصير «شابة» أو على الأقل «أكثر شبابًا». لن يسير الأمر على هذا النحو المباشر، فهناك الكثير جدًّا من

التفاصيل المتعلقة بهذا الشأن، والكثير جدًّا من المساومات. ولكن إذا قضينا جزءًا من الوقت والجهد المخصَّصين للأبحاث الطبية الهادفة لدراسة الآليات المسببة للشيخوخة، فسأُصاب بالدهشة إذا لم نتوصَّل إلى حل لمشكلة الشيخوخة خلال العقدين القادمين، حل يشفي جميع أمراض الشيخوخة على الفور.

قد يعتري بعض الناس شعور بالقلق بشأن مدى أخلاقية إطالة العمر، ولكنني أظن أن هذا الأمر لن يُمثِّل مشكلة حقيقية. فالمكسب في زيادة العمر الذي نحصل عليه نتيجة لتقييد السعرات، مثلًا، يتضاءل ظاهريًّا مع زيادة المدى العمري. ففي حين أن الجرذان يتضاعف لديها المدى العمري (نتيجة لتقييد السعرات)، فإن نفس الزيادة العمرية لا تُرى في القردة الريصية. لم تكتمل الدراسات على القردة بعد، ولكن من المرجَّح أنه فيما يتعلَّق بالمدى العمري فإن الفوائد الناتجة ستكون أكثر تواضعًا. ومع ذلك، فقد يختلف الأمر فيما يتعلَّق بالفوائد الصحية؛ إذ توحي التغيرات الكيميائية الحيوية لدى القردة الريصية بأن القرود المسنة تعاني قَدْرًا أقل من أمراض الشيخوخة، حتى لو لم يكن مداها العمري قد طال بقدرٍ كبير. وأعتقد أنه سيكون من الأسهل إطالة المدى الصحي أكثر من إطالة المدى العمري. فإذا استطعنا ابتكار حبة مضادة للشيخوخة تضاهي فوائد تقييد السعرات، مع تجنُّب عيوبه، فمن الأرجح حينئذٍ أن نرى تحسُّنًا عامًّا في الصحة والمزيد والكثير من الأصحاء الذين يبلغون سن المائة، وهو شيء يُذكِّرنا باليابانيين المحظوظين المتمتعين بالنسخة المختلفة من الميتوكوندريا، ولكنني أشك في أن نرى إنسانًا يعيش حتى سن ألف عام، أو حتى مائتي عام. إنها مهمة ثقيلة، في حال قبلنا الاضطلاع بها.[١٢]

الأرجح أن البشر لن يستطيعوا العيش إلى الأبد، كما لا يرغب الكثيرون في هذا من الأساس. وتكمن المشكلة في بنية المستعمرات الأولى، وهي التمييز بين الخلايا الجنسية والخلايا الجسدية. فما إن تبدأ الخلايا في التمايز، حتى يصير الجسم بخلاياه الجسدية القابلة للفناء تابعًا للخلايا الجنسية. وكلما زادت درجة تخصص تلك الخلايا الجسدية، عظمت منافعها للجسم ككلٍّ، وللخلايا الجنسية بصفة خاصة. وأكثر خلايا الجسم تخصصًا على الإطلاق هي الخلايا العصبية للمخ البشري. والخلايا العصبية تختلف عن غيرها من الخلايا العادية في أنه لا يمكن تعويضها، وكلٌّ منها يتصل بما يصل إلى عشرة آلاف تشابك عصبي، وكل تشابك عصبي تستقر به خبراتنا وتجربتنا الإنسانية الفريدة. إن مخاخنا غير قابلة للتعويض. فإذا ماتت خلايانا العصبية، لا يُوجَد مخزون من

الخلايا الجذعية لتعويضها، وإذا نجحنا يومًا ما في هندسة مثل ذلك المخزون من الخلايا الجذعية العصبية، فسيتعيَّن علينا الاستغناء عن خبراتنا المختزنة في الخلايا الأصلية؛ ومن ثمَّ سيكون ثمن خلودنا هو إنسانيتنا.

الخاتمة

في واحدة من أكثر اللقطات المصوَّرة تليفزيونيًّا تأثيرًا في النفس، جال جاكوب برونوفسكي خلال المنطقة المحيطة بأوشفيتز، حيث ألقى رماد ٤ ملايين نسمة أُحرِقوا في محرقتها بمن فيهم بعض أفراد أسرته، وتحدَّثَ إلى الكاميرا، محاولًا أن يتمالك نفسه، وقال: إن العلم لا يقضي على إنسانية البشر، ولا يُحوِّلهم إلى مجرد أرقام. ولكن محرقة أوشفيتز فعَلَتْ ذلك. ليس بالغاز السام، وإنما بالعجرفة، وبالتكبر والصَّلَف، وبالعناد والجهل. إن هذا يحدث حينما يتطلع الناس للتحلي بمعرفة الآلهة، ويفقدون اتصالهم بالواقع.

والعلم الحقيقي، على العكس من ذلك، صورة شديدة الإنسانية من المعرفة. ولقد عبَّر برونوفسكي عن الأمر بطريقته المؤثرة قائلًا: «إننا نقف دائمًا على شفا المعلوم، ونشعر دائمًا بما يدفعنا للأمام نحو آمالنا المنشودة. وكل رأي في العلم يقف على حافة الخطأ، وهو رأي شخصي. وما العلم إلا شاهد على ما يمكننا أن نعرفه مع أننا غير معصومين من الخطأ.»

تَمَّ تصوير هذا المشهد من المسلسل الوثائقي «ارتقاء الإنسان» وعرضه على شاشة التليفزيون في عام ١٩٧٣. وفي العام التالي تُوفِّي برونوفسكي بنوبة قلبية. فهو بشر ضعيف وغير معصوم من الخطأ مثل العلم البشري، ولكن عاش إلهامه حتى اليوم، ولستُ أعرف تجسيدًا لروح العلم أفضل من هذا. وبهذه الروح، وبالعنوان الذي يُعبِّر عن الإجلال على نحوٍ غير مباشر، سار هذا الكتاب على شفير المعلوم. وهو مليء بالآراء الشخصية التي تقف على حافة الخطأ. إنه احتفاء بما نعلمه، بالرغم من كوننا غير معصومين من الخطأ.

ولكن أين هو هذا الخط الفاصل بين الزيف والحقيقة؟ قد يختلف معي بعض العلماء في تفاصيل ذُكِرَتْ في هذا الكتاب، وقد يتفق آخرون. تنشب الاختلافات عند

حافة الخطأ، ومن السهل أن يقع المرء في الخطأ. ولكن إذا تغيَّرَت التفاصيل أو ثبت خطؤها، فهل يجعل هذا القصة الأكبر خطأً أيضًا؟ هل المعرفة العلمية نسبية، لا سيما عند تطبيقها على الماضي السحيق؟ هل يمكن اختبارها، كما يحدث كل يوم مِنْ قِبَل أولئك الذين ركنوا إلى الدعة واعتناق معتقدات جامدة؟ أم أن علم التطور هو الآخر بات معتقدًا جامدًا، يرفض الخضوع للاختبار؟

الإجابة، في اعتقادي، هي أن الأدلة يمكن أن تكون قابلة للخطأ وطاغية في الآن عينه. فلا يمكننا مطلقًا أن نعرف الماضي بكل تفاصيله؛ فدائمًا ما تكون تأويلاتنا عرضة للخطأ، ومفتوحة دائمًا لأكثر من قراءة واحدة. ولهذا نجد العلم عرضة للخلاف في وجهات النظر. ولكن العلم لديه قدرة فريدة على إحراز نجاحات مفيدة من خلال التجربة والملاحظة، ومن خلال الاختبارات التي تجري في الواقع، والتفاصيل الناتجة التي لا حصر لها ينجم عنها شيء أكبر، مثل الكاميرا الحديثة التي إذا تم ضبطها على البُعْد الصحيح فإنها تنتج صورة ملونة شديدة الوضوح، بها ما لا حصر له من البكسلات. والتشكيك في تطور الحياة — حتى لو تبيَّن خطأ بعض التفاصيل التي ذُكِرَتْ في هذا الكتاب — إنما يعني التشكيك فيما أجمعَتْ عليه الأدلة، من الجزيئات إلى البشر، ومن البكتيريا إلى النظم الكوكبية. إنه يعني التشكيك في أدلةِ علم الأحياء وتوافُقِه مع علوم الفيزياء والكيمياء والجيولوجيا والفلك. إنه يعني التشكيك في صدق التجربة والملاحظة، والتشكيك في عملية الاختبار الواقعية. إنه يعني، في نهاية المطاف، التشكيك في الواقع ذاته.

أظن أنَّ الصورة الموضَّحة في هذا الكتاب حقيقية. فمن المؤكد أن الحياة تطوَّرَتْ على طول الخطوط الموصوفة هنا. وهذا الاقتناع ليس ناجمًا عن اعتقاد متشدد، وإنما بُنِي على أساس دلائل اختُبِرَتْ في الواقع وصُحِّحَتْ بما يتوافق معه. لا أعرف ما إذا كانت هذه الصورة العامة تتعارض مع الإيمان بالرب أم لا. فبعض من درسوا علم التطور عن كثب يرون هذا، بينما ينكره البعض الآخر. ولكن أيًّا كانت معتقداتنا فإن غنى فهمنا وإدراكنا ينبغي أن يكون سببًا للفخر والاحتفاء. وإنه لأمر رائع للغاية أن نتشارك الكثير مع الحياة الموجودة حولنا على تلك الكرة الأرضية ذات اللونين الأزرق والأخضر، التي تهيم في جوف فضاء أجرد لا نعرف له نهاية. هذه النظرة تحمل ما هو أكثر من الجمال؛ إذ تنقل لنا بهاء الحياة وعرضتها للوقوع في الخطأ في الوقت نفسه، إلى جانب التلهف الإنساني والتوق إلى المعرفة.

ملاحظات

الفصل الأول: أصل الحياة

(١) بصفة خاصة، هذا تفاعل اختزالي، تنتقل فيه الإلكترونات من واهب (الهيدروجين) إلى مستقبِل (الأكسجين)، الذي يحتاج إليها أكثر بكثير ليكوِّن الماء؛ ذلك المنتج النهائي المستقر من منظور الديناميكا الحرارية. وتتضمن جميع التفاعلات الاختزالية عملية نَقْلٍ للإلكترونات من واهب إلى مستقبل؛ ومن الواضح أن جميع صور الحياة، من البكتيريا إلى الإنسان، تعتمد على عمليات نقل للإلكترونات بشكلٍ أو بآخر من أجل الحصول على الطاقة. وهذا ما أكده العالِمُ المجريُّ الحائز جائزة نوبل ألبرت زنت جيورجي؛ حيث قال: «ليست الحياة سوى إلكترون يبحث عن مكان يستقر فيه.»

(٢) هذه المقولة ليست صحيحة تمامًا؛ إذ إن الفوهات ينبعث منها ضوء خافت (يناقَش هذا في الفصل السابع)، وهو شديد العتامة لدرجة أن العين البشرية لا تستطيع أن تلحظه، ولكن قوته تكفي للحثِّ على عملية البناء الضوئي في بعض البكتيريا. ولكن تلك البكتيريا لا تسهم إلا بالقليل في وفرة المنظومة البيئية إذا قُورِنَتْ ببكتيريا الكبريت. ومن المصادفات أن عدم أهمية وجود الحرارة والضوء قد تأكَّد باكتشاف مواقع يتسرَّب منها الماء البارد عند قاع المحيط؛ حيث يُوجَد الكثير من نفس مظاهر الحياة الحيوانية الوافرة التي تُوجَد في تلك الفوهات.

(٣) هناك مشكلات أخرى تشمل درجة الحرارة (يقول البعض إنها تكون شديدة الحرارة لدرجةٍ تَمْنَع وجود الجزيئات العضوية)، والحموضة (أغلب المداخن السوداء تكون شديدة الحموضة لدرجة لا تتيح لها أن تدعم النظرية الكيميائية التي يفترضها

فاختزهاوزر، ولم تنجح العمليات التخليقية التي أجراها في مختبره إلا في ظروف قلوية فقط)، والكبريت (فمقداره أكبر مما ينبغي، بما لا يتوافق مع الكيمياء الحيوية الحديثة).

(٤) هناك تساؤل يثير الاهتمام عن العواقب طويلة الأمد الناتجة عن تبريد قلب الكرة الأرضية؛ فمع برودة الغلاف الخارجي للقشرة الأرضية (طبقة الوشاح) سيميل ماء البحر للارتباط بالصخور فيبقى جزءًا من تركيبها، بدلًا من أن يُدفَع بفعل السخونة مجددًا إلى السطح من خلال النشاط البركاني. وربما يؤدي تبريد الكوكب الأرضي إلى استهلاك محيطاته بهذه الكيفية، ولعل هذه العملية قد أسهمت في ضياع المحيطات التي كانت على كوكب المريخ.

(٥) هناك نمطان من الخلايا البدائية الخالية من النوى؛ وهما: البكتيريا، والعتائق. كان السكان الرئيسيون لحقل المدينة المفقودة من العتائق التي تستمد طاقتها من خلال إنتاج غاز الميثان (عملية توليد الميثان). ولدى العتائق طبيعة كيميائية حيوية تختلف كثيرًا عن الخلايا حقيقية النوى المعقدة التي تشكل بنيان النباتات والحيوانات. وإننا نعرف حتى الآن أن العتائق لم يُشتَق منها أي عوامل مَرَضيَّة أو طفيليات معروفة، وإنما كلها من البكتيريا التي تتشارك في طبيعتها الكيميائية الحيوية بقدر أكبر بكثير مع خلاياها العوائل. ربما كانت العتائق شديدة الاختلاف فحسب. وثمة استثناء واحد، هو الشراكة التي بين إحدى العتائق وأحد البكتيريا، التي ربما أدت إلى تكوُّن الخلية حقيقية النواة ذاتها منذ مليارَيْ سنة؛ انظر الفصل الرابع.

(٦) الاسم الكيميائي للخل هو حمض الأسيتيك (حمض الخليك)، ومنه جاءت التسمية «أسيتيل». يرتبط جزيء الأسيتيل ثيوإستر بذرتيه من الكربون بمجموعة كبريت متفاعلة. وعلى مدة عقدين ماضيين ظَلَّ كريستيان دي دوف يركز على الأهمية الأساسية للأسيتيل ثيوإستر في المرحلة المبكرة من عملية النشوء والتطور، وقد بدأ العلماء التجريبيون في أخذ آرائه على محمل الجد.

(٧) لكل من يريد معرفة القصة بكاملها، مع المزيد من المعلومات عن أعجوبة عملية التناضح الكيميائي وأهميتها الكبيرة، يمكنه الرجوع إلى كتابي «القدرة والجنس والانتحار: الميتوكوندريا ومعنى الحياة».

الفصل الثاني: دي إن إيه

(١) مع حدوث الكثير جدًّا من الطفرات الجديدة، قد تتساءل: لماذا لا يحدث لنا جميعًا انفجار تحولي؟ ونفس السؤال يؤرِّق الكثيرين من علماء الأحياء. والإجابة في كلمةٍ واحدة هي «التكاثر الجنسي»، وشرح ذلك تجده في الفصل الخامس.

(٢) هذا الشكل يتعلَّق بتشابه تسلسل الدي إن إيه. وقد حدثت أيضًا تغيُّرات أخرى أكبر، مثل عمليات الحذف والاندماج الكروموسومية منذ حدوث التشعب بين الشمبانزي والبشر؛ مما أعطى تماثلًا جينوميًّا ككلٍّ بنسبة تقارب ٩٥ بالمائة. وبالمقارنة نجد أن الفروق الجينية بين المجتمعات البشرية ضئيلة؛ فنحن البشر متماثلون جينيًّا بنسبة ٩٩٫٩ بالمائة. ويعكس هذا الاختلاف الضئيل حقيقة مرور البشر من «عنق الزجاجة» منذ فترة حديثة نسبيًّا، ربما منذ ١٥٠ ألف سنة مضت، بسببها صار عدد قليل من السكان في القارة الأفريقية هم أصل جميع الأعراق البشرية الحديثة، عن طريق موجات متتابعة من الهجرة من أفريقيا.

(٣) استُبدِلَتْ هنا بقاعدة الثيامين في الدي إن إيه قاعدة مختلفة قليلًا تُسمَّى اليوراسيل في الآر إن إيه. وهذا أحد اختلافين ضئيلين في البنية التركيبية بين الآر إن إيه والدي إن إيه، والاختلاف الآخر هو استعمال سكر الريبوز بدلًا من الريبوز منزوع الأكسجين في الدي إن إيه. وسوف نرى فيما بعد ما يصنعه هذان التفصيلان الكيميائيان الضئيلان من فارق وظيفي كبير.

(٤) كيف إذن تتجنَّب الطبيعةُ هذه المشكلةَ؟ الإجابة بسيطة؛ فهي تبدأ عند بداية الدي إن إيه المرسال وتنتهي عند نهايته، وبدلًا من تراص وحدات الآر إن إيه الناقل وتعلُّقها كالخنازير الصغيرة التي ترضع من حلمات أثداء أمها، فإن العملية تجري آليًّا؛ إذ يتم تلقيم الآر إن إيه المرسال مثل شريط التسجيل الصوتي من خلال ريبوسوم يعمل كقارئ للشريط؛ إذ يقرأ كل كودون بدوره إلى أن يصل إلى النهاية. وبدلًا من أن يُغلق البروتين ككلٍّ حتى نهايته، فإنه يُمده جزءًا جزءًا، إلى أن يتم تحريره حينما يصل الريبوسوم إلى النهاية. ويمكن أن تؤدي عدة ريبوسومات دورها على طول نفس شريط الآر إن إيه المرسال مرة واحدة، وكل واحد منها يبني بروتينًا جديدًا في طريقه.

(٥) لا تهمنا الأسماء، لكن يمكن القول إنه إذا كان أول حرف من الشفرة هو C؛ يكون الحمض الأميني الذي يتم تشفيره مشتقًّا من مادة الألفا–كيتوجلوتارات، وإذا كان A، يكون الحمض الأميني مشتقًّا من الأوكسالوسيتات؛ وإذا كان T، يكون من

البيروفات. وأخيرًا، إذا كان الحرف الأول هو G، فإن الحمض الأميني يتكوَّن في خطوة واحدة مكافئة من أي عدد من المواد القَبْلية البسيطة.

(٦) من المحتمل أن عملية نقل الحمض الأميني إلى الآر إن إيه تعتمد على تسلسل الآر إن إيه. وقد أظهر مايكل ياروس وزملاؤه بجامعة كولورادو أن جزيئات الآر إن إيه الصغيرة المحتوية على تسلسلات مضادات الكودون المتعددة تربط الحمض الأميني «الصحيح» بقوة ربط تزيد مليون مرة عن الأحماض الأمينية الأخرى.

(٧) إن التجربة المعملية تحتاج للإنزيم أيضًا، وهو يُسمَّى بوليميراز الدي إن إيه. ومن المرجح أن يحتاج الأمر إلى إنزيم لتعزيز عملية التكاثر المتضاعف للآر إن إيه أو الدي إن إيه في الفوهات أيضًا، ولكن لا يُوجَد ما يدفعنا إلى الجزم بأن الإنزيم يجب أن يكون بروتينًا. ومن المفترض أن يفعل إنزيم ريبليكاز الآر إن إيه نفس الشيء، وصار العثور على هذا الإنزيم الهدف الشاغل للكثيرين دون نجاح، وإن كان وجوده يبدو مرجحًا.

(٨) لقد أُخِذَتْ طريقتنا (حقيقية النوى) للتكاثر المتضاعف للدي إن إيه من العتائق، وليست البكتيريا؛ لأسباب سوف نستكشفها في الفصل الرابع.

(٩) قال واطسون وكريك: «لعل من المستحيل بناء هذا التركيب (اللولب المزدوج) بوضع سكر الريبوز محل الريبوز منزوع الأكسجين؛ لأن هذا إذا حدث فستُسبِّب ذرةُ الأكسجين الزائدة تلامُسَ فان در فالز شديدًا.»

الفصل الثالث: عملية البناء الضوئي

(١) تزيد كمية الأكسجين في الغلاف الجوي بحوالي ٥٥٠ مرة عن ثاني أكسيد الكربون، ومن الواضح أن هذا يجعل من السهل زيادة مستويات ثاني أكسيد الكربون إلى الضعفين أو إلى ثلاثة أضعاف. ولكن مع أن مستويات الأكسجين لم تتغيَّر كثيرًا مطلقًا، فإن ارتفاع درجات الحرارة يُقلِّل قابلية ذوبان الأكسجين في الماء. ولقد تأثرت أعداد الأسماك بالفعل بانخفاض مستويات الأكسجين الذائب في المحيطات. فعلى سبيل المثال، تتفاوت أعداد سمك الإلبوت في بحر الشمال عامًا بعد عام حسب تركيز الأكسجين الذائب؛ فكلما نقص الأكسجين نقصت أعداد السمك.

(٢) لمزيد من المعلومات عن دور الأكسجين في التطور، اقرأ كتابي «الأكسجين: الجزيء الذي صنع العالم».

(٣) إذا أردت معرفة المزيد يسعدني أن أوصي لك بكتاب أوليفر مورتون «التهام الشمس».

(٤) حينما قرأ تي إتش هكسلي كتاب «أصل الأنواع» لداروين قال متعجبًا: «ما أشد غباءنا؛ إذ لم نفكر في هذا من قبل!»

(٥) في الطيف الكهرومغناطيسي تُوجَد علاقة عكسية بين الطاقة والطول الموجي، فكلما نقص طول الموجة كانت الطاقة أعلى. والكلوروفيل يمتص الضوء عند الجزء المرئي من الطيف، وتحديدًا الضوء الأحمر. وتُعرَف الصورة المؤكسدة القوية من الكلوروفيل باسم P680؛ إذ إنها تمتص الضوء بطول موجي يساوي ٦٨٠ نانومترًا. بينما تمتص صور أخرى من الكلوروفيل النباتي الضوء الأقل طاقة قليلًا الذي طوله الموجي ٧٠٠ نانومتر. ولا تحتاج عملية البناء الضوئي إلى الضوءين الأزرق والأصفر بتاتًا؛ ومن ثم يتم عكسهما مجددًا (أو يمرَّان عبر النبات). ولهذا السبب نرى النباتات الكلوروفيلية بلون أخضر.

(٦) لمن يتعجبون من اكتساب الكيمياء الحيوية سمعةً سيئةً أقول توضيحًا لهم إن المسمى NADPH هو اختصار لعبارة: نيكوتيناميد أدينين ثنائي النيوكليوتيد الفوسفات. وهو «عامل مختزل» قوي؛ بمعنى أنه دافع قوي للإلكترونات من الذرات.

(٧) فعليًّا، هي لا تُسمَّى النظم الضوئية في البكتيريا، وإنما هي الوحدات البنائية الضوئية. إلا أن مراكز التفاعلات البكتيرية تعطي صورة مسبقة للنظم الضوئية النباتية بدقة شديدة في كلٍّ من التركيب والوظيفة لدرجة تجعلني أُصِرُّ على استخدام نفس المصطلح.

(٨) البورفيريا هي بالفعل مجموعة من الأمراض التي تنجم عن تراكم البورفيرينات في الجلد والأعضاء. وأغلب صور البورفيريا حميدة تمامًا، ولكن أحيانًا ما يحدث تنشيط للبورفيرينات المتراكمة بفعل الضوء فتسبب أشد الحروق إزعاجًا. وتكون أسوأ صور المرض، مثل بورفيريا تكوُّن الكريات الحمر المزمنة، شديدة التدمير لدرجة أن يحدث تآكل للأنف والأذنين وتآكل للثة فتبدو الأسنان بارزة كأنياب الحيوان، مع تكوُّن نسيج ندبي ونمو الشعر على الوجه. وقد ربط بعض علماء الكيمياء الحيوية بين هذه الحالات والأساطير الشعبية المتوارثة عن مصاصي الدماء والمذءوبين؛ مما أثار حفيظة الأشخاص المصابين بالأشكال الطفيفة من المرض، الذين يشعرون أن لديهم ما يكفي من تحدي المرض وليسوا في حاجة للمزيد من وصمهم بالعار. وفي واقع الأمر إن أسوأ

صور البورفيريا لم نَعُدْ نراها هذه الأيام إلا نادرًا؛ إذ أدَّى اتخاذ الاحتياطات وتحسن العلاجات إلى الحد من الآثار السيئة للمرض. وما هو أكثر إيجابية أن الخصائص الكاوية للبورفيرينات الحساسة للضوء قد استُخدِمَتْ بشكلٍ جيِّد كعلاج للسرطان — يُسمَّى العلاج الديناميكي الضوئي — وفيه يُستعمَل الضوء لتنشيط البورفيرينات الموجهة إلى الورم لتدميره.

(٩) يقول جون أَلِن: إن النظامين الضوئيين قد تشعَّبا في سلف للبكتيريا الزرقاء تحت استخدام مختلف، بينما يزعم آخرون أن النظامين الضوئيين تشعَّبا في خطَّيْن مختلفين تمامًا من البكتيريا، وانضمَّ أحدهما إلى الآخر فيما بَعْدُ عن طريق نوع من الالتحام الجيني مكوِّنَيْن هجينًا جينيًّا كان هو نفسه سلف البكتيريا الزرقاء الحديثة. وقد ظهرت مؤخرًا بعض الأدلة التي تُعضِّد وجهة نظر أَلِن (مفترضة أن النظامين الضوئيين مرَّا من البكتيريا الزرقاء إلى خطوط أخرى بدلًا من العكس)، ولكن في الوقت الحاضر تُعتبَر الأدلة الجينية غير قاطعة. ومع ذلك، وأيًّا كان الأمر، فلا بد أن النظامين الضوئيين قد أدَّيا وظائفهما بشكلٍ مستقل بادئًا ذي بدء.

(١٠) يقول جيم باربر إن هذه هي بالضبط الطريقة التي يتكوَّن بمقتضاها المركب المطلق للأكسجين اليوم؛ فإذا أُزيل المركب من النظام الضوئي ٢ ووُضِع النظام الضوئي «الخاوي» في محلول يحتوي على أيونات المنجنيز والكالسيوم، ثم سُلِّطت عليه سلسلة من الومضات الضوئية، فإن هذا يمكن أن يُعِيد تشكيل هذا المركب. وتعمل كل ومضة على أكسدة أيون واحد من المنجنيز الذي بعد أكسدته يرتبط بموضعه الصحيح مع المركب. وبعد خمس ومضات أو ست تصير أيونات المنجنيز والكالسيوم كلها في مواضعها، مُعِيدةً تشكيل المركب المطلق للأكسجين بكامله. وبتعبيرٍ آخر، فإن المركب إذا أُعطي السياق الصحيح من البروتين فإنه يكون ذاتي التشكل.

الفصل الرابع: الخلية المعقدة

(١) وقت قراءتك لهذه السطور، قد لا يعني نظام ويندوز إكس بي شيئًا لك أكثر من ويندوز ٢٨٦. فسيكون قد اندثر هو أيضًا واستُبدِل به نظام آخر أكثر تعقيدًا (وإن كان هو الآخر غير مستقر وعرضة للفيروسات).

(٢) وهذا لا يعني أن نقول إنه لا تُوجَد أي مكافئات بكتيرية. فمثلًا يتكون الهيكل الخلويُّ للبكتيريا من البروتينات التي تتضح بجلاء صلتها بمكافئات حقيقية النوى؛

ذلك لأن بنيتهما التركيبية متشابهة لدرجة أنه يمكن المطابقة بينهما مكانيًّا. ولكن حتى في هذه الحالة، فقد تشعَّبَت التسلسلات الجينية لدرجة فقدان كل تطابق. لو حكمنا في الأمر على أساس التسلسل الجيني وحده لاعتبرنا البروتينات الهيكلية الخلوية حقيقية النوى بشكلٍ فريد.

(٣) يؤكد وويس أن شجرة الآر إن إيه الريبوسومي التي افترضها تُعتَبَر صحيحة؛ لأن الجين الخاص بالآر إن إيه الريبوسومي الفرعي لا يتطوَّر ببطء وحسب، وإنما لا يمكن مطلقًا تبادله من خلال عملية نقل جيني جانبي؛ إذ يتم توريثه رأسيًّا فحسب، أي من الخلية الأم إلى الخلية الابنة. لكن هذا ليس صحيحًا بالضبط؛ إذ تُوجَد أمثلة للنقل الجانبي لجين الآر إن إيه الريبوسومي بين البكتيريا، مثل بكتيريا السيلان (نيسيريا جونوريا). وأما عن درجة شيوع هذه العملية على مدار الزمن التطوري، فهذا تساؤل آخر، ولا يمكن الإجابة عنه إلا من خلال أشجار «توافقية» أكثر تعقيدًا باستخدام جينات كثيرة.

(٤) هذه نسخة خلوية من ذلك الخلاف الفلسفي القديم عن الهوية: هل نحتفظ بإحساسنا «بالذات» إذا استطعنا استبدال كل أجزاء المخ البشري باستثناء الأجزاء الصغيرة المسئولة عن الذاكرة؟ وإذا أمكن زرع تلك الأجزاء الخاصة بالذكريات في مخ شخص آخر، فهل ستنتقل إليه شخصية الإنسان الواهب؟ والخلية بالتأكيد هي مثل الشخص، مجموع لأجزائها.

(٥) إن عملية التطور، بطبيعة الحال، تفعل كلا الأمرين، ولا تعارض البتة؛ ويتلخص الفارق فيما إذا كانت سرعة التغيير تُقاس على مدى الأجيال، أم الحقب الجيولوجية. وأغلب الطفرات الجينية تكون مدمرة ويتم التخلص منها من قبل الانتقاء الطبيعي، تاركًا كل شيء كما هو، ما لم تؤدِّ التغيرات البيئية (مثل حالات الانقراض الشامل) إلى تغيير الوضع الراهن. وحينئذٍ يمكن أن يكون التغير سريعًا فيما يتعلَّق بالزمن الجيولوجي، ولكنه لا يزال يتحقَّق بفعل نفس العمليات عند مستوى الجينات، ولا يزال بطيئًا فيما يتعلَّق بالتغيُّر من جيل إلى الجيل الذي يليه. ويعتمد التركيز على الكوارث أو على التغيرات الصغيرة بقدرٍ كبير على المزاج الشخصي، وما إذا كان العلماء متحمسين لهذه الفكرة أو تلك.

(٦) تفترض «فرضية الهيدروجين» لبيل مارتن وميكلوس مولر أن العلاقة هي بين أحد العتائق، الذي ينمو معتمدًا على الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون، وبين أحد

البكتيريا القادر على التنفُّس بالأكسجين أو التخمُّر لإنتاج الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون، حسبما تقتضيه الظروف. وهذا النوع من البكتيريا المتنوِّع الأنشطة يفترض أن بإمكانه الإفادة من غاز الميثان المنطلق كنفاية من العتائق. ولكني لن أناقش هذه الفكرة بأكثر من هذا هنا؛ فقد فعلتُ هذا بإسهابٍ أكثر في كتابٍ سابق، عنوانه «القدرة والجنس والانتحار: الميتوكوندريا ومعنى الحياة». وقد أوردت الأفكار التي ناقشتها في الصفحات التالية بتفصيل أكثر في ذلك الكتاب.

(٧) من الناحية التقنية، النسبة بين مساحة السطح والحجم تقل عند زيادة الحجم؛ لأن مساحة السطح تزداد كالمربع (أي بالتربيع) بينما يزداد الحجم كالمكعب (أي بالتكعيب). فزيادة الأبعاد الطولية مرتين تؤدي إلى زيادة مساحة السطح أربعة أضعاف (٢ × ٢ = ٤)، ولكنها تؤدي إلى زيادة الحجم ثمانية أضعاف (٢ × ٢ × ٢ = ٨). ويكون نتاج هذا أن كفاءة الطاقة تتناقص كلما كبرت أحجام البكتيريا؛ إذ يصير الغشاء البكتيري المستعمل في توليد الطاقة أصغر بالمقارنة بحجم الخلية.

(٨) ذكرتُ هذه الحالة في محاضرات لي حول العالم، وما زلتُ أُواجَه بانتقاداتٍ «قاتلة». وأقربها مِنْ قِبَل كافالير سميث، الذي يشير إلى قليل من الخلايا حقيقية النوى التي تمارس البلعمة الخلوية دون الميتوكوندريا في الوقت الحاضر. ولستُ أظن أن وجودها يدحض ما قُلْتُه؛ إذ إن أقوى ضغوط الانتقاء تكون ضد بدائيات النوى التي تتنفَّس من خلال أغشيتها الخارجية. وما إن تنشأ الخلية البلعمية، يكون من المحتمل أن تذوي أو ينقص منها جزء أو أكثر من أجزائها تحت ظروف مختلفة، وهي عملية تطوُّر اختزالي تشيع في الطفيليات. ومن الأسهل بكثير أن تَفْقِد خلية بلعمية كاملة النشوء الميتوكوندريا تحت ظروف معينة، مثل تحوُّلها إلى الحياة الطفيلية، من أن يتطور كائن بدائي النواة إلى خلية بلعمية دون مساعدة من الميتوكوندريا.

الفصل الخامس: التكاثر الجنسي

(١) يقول البعض: إن هذه السيدة هي السيدة باتريك كامبل، أشهر ممثلة إنجليزية سيئة السمعة، التي استوحى منها شو فيما بَعْدُ شخصيةَ إليزا دوليتل في رواية «بيجماليون»، ويقول البعض الآخر إنها رائدة الرقص الحديث ذات الفضائح إيزادورا دنكان. ولكن يُرجَّح أن تكون هذه القصة مختلقة.

(٢) في أوغندا، إحدى الدول الأفريقية القليلة التي تمكَّنَتْ من قلب موازين الإيدز، انخفضت نسبة انتشار فيروس الإيدز من ١٤ بالمائة إلى ٦ بالمائة على مدى عقد واحد، وقد نجم هذا بدرجة كبيرة عن الإعلام العام والتوعية الجيدة. كانت الرسالة بسيطة نظريًّا وعمليًّا كذلك؛ وهي تجنُّب الجنس بدون وقاية. وقد أظهرت إحدى الدراسات أن نجاح تلك الحملة البدائية البسيطة في أوغندا قام على مبادئ ثلاثة هي: العفة، والأمانة، واستخدام الواقي عند الجماع. وكان النجاح في معظمه عائدًا إلى العامل الثالث.

(٣) سلوك سبق أن تنبَّأ به ريتشارد دوكينز في كتابه «الجين الأناني»، ومنذ ذلك الحين تأكدت وجهة نظره الثاقبة.

(٤) لا تتكاثر البكتيريا استنساخيًّا بهذا المفهوم تمامًا؛ لأنها أيضًا تكتسب الدي إن إيه بالنقل الجانبي من مصادر أخرى. وبهذا المعنى تُعتبَر البكتيريا أكثر مرونة بكثير من حقيقيات النوى اللاجنسية. ويمكن إدراك الفارق الذي تصنعه عملية النقل هذه للبكتيريا في الانتشار السريع لمقاومتها للمضادات الحيوية، وهو ما يتحقق عادة من خلال النَّقْل الجانبي للجينات.

(٥) هذه القصة رواها مات ريدلي بموهبته المعهودة في كتابه «الملكة الحمراء» الذي نُشِرَتْ طبعته الأولى عام ١٩٩٣.

(٦) قد تعترض على فكرة أن جهاز المناعة تطوَّر ليفعل ذلك. صحيح أن جهاز المناعة يفعل ذلك، ولكنه في الواقع يعاني من نقطة ضعف لا يمكن إصلاحها إلا من خلال التكاثر الجنسي. فلِكَيْ يمارس جهازُ المناعة عملَه لا بد أن يميِّز بين ما هو «ذاتي» وما هو «دخيل». فإذا ظلت البروتينات التي تحدِّد ما هو «ذاتي» كما هي جيلًا بعد جيل، فإن كل ما يجب أن يفعله أيُّ كائن طفيلي لكي يتهرب من جهاز المناعة هو أن يخفي نفسه داخل بروتينات تبدو مثل البروتينات «الذاتية» للعائل؛ فيعيش حياته داخل جسمه دون مقاومة. وهذا ما يحدث لأي مجتمعات استنساخية لديها جهاز مناعي. والتكاثر الجنسي وحده (أو حدوث طفرات جينية بمعدلات عالية جدًّا في مواطن مهمة محددة) يمكنه أن يُغَيِّر إدراك الجهاز المناعي للذات في كل جيل.

(٧) هذا ليس صحيحًا تمامًا؛ فأحد الأسباب وراء عدم اختفاء الكروموسوم Y تمامًا هو أنه يحتوي على نسخ متعددة من نفس الجين. يبدو أن هذا الكروموسوم ينثني بشكل مزدوج؛ مما يتيح حدوث إعادة تجميع للجينات على نفس الكروموسوم. وحتى هذه التوليفات المحدودة يبدو أنها أنقذت الكروموسوم Y من الوقوع فريسة

للنسيان، في معظم الثدييات على الأقل. إلا أن بعض الثدييات مثل فئران الخلد الآسيوية، فقدت كروموسوم Y تمامًا. وليس معروفًا كيفية تحديد جنس ذكورها بدقة، ولكن الأمر المطمئن لذكور البشر أنهم غير محكوم عليهم بالارتباط بهذا الكروموسوم المتدهور إلى الأبد.

(٨) هاتان المقولتان لا تقولان شيئًا عن هوية خلية العائل أو طبيعة الاتحاد التكافلي بين الخلايا، وهما وجهان مسببان للخلاف في وجهات النظر. ولا يهم في هذا السيناريو، ما إذا كانت خلية العائل لديها نواة أو جدار خلوي أو تعيش معيشة بلعمية. ومن ثم، ففي حين أن أصل الخلية حقيقية النواة مثير للجدل من أوجه كثيرة، فإن الأفكار المحددة هنا مستقلة عن أي نظرية بعينها.

الفصل السادس: الحركة

(١) كان ويليام كرون واحدًا من الأعضاء المؤسسين للجمعية الملكية ولا يزال اسمه يتردد في المحاضرة التي تُلقى باسمه — المحاضرة الكرونية — وهي المحاضرة الأولى الرئيسية بهذه الجمعية عن العلوم البيولوجية.

(٢) اشتهر عن تشرشل أنه كتب يقول: «سيكون التاريخ رحيمًا بي؛ لأنني أنوي أن أكتبه.» وقد حازت كتاباته الرائعة بحق على جائزة نوبل في الأدب عن عام ١٩٥٣، وكانت المرة الأولى والأخيرة التي تفوز فيها كتابات تاريخية بجائزة نوبل في الأدب.

(٣) قام كلٌّ من بيرتس وكندرو أولًا بتحديد تركيب الجلوبين العضلي (الميوجلوبين) في حوت العنبر؛ مما يبدو اختيارًا غريبًا. وكان ما دفعهما إلى ذلك هو أن الميوجلوبين يتبلور في بِرَك الدماء المتراكمة على أسطح مراكب صائدي الحيتان (ويُوجَد بتركيزات أعلى كثيرًا في عضلات الثدييات الغواصة مثل الحيتان). ويُعَدُّ ميله هذا للتبلور ذا أهمية؛ إذ يحتاج التصوير البلوري إلى وجود شكل من البلورات، أو تركيب متكرر على الأقل.

(٤) تتكوَّن العضلات المختلفة من خليط من ألياف مختلفة، وتعتمد الألياف سريعة الانقباض على التنفس اللاهوائي كمصدر للقوة، وهو سريع ولكنه غير فعَّال؛ فهذه الألياف تنقبض بسرعة (بالميوسينات السريعة) ولكنها تتعب بسهولة. وتقل حاجتها إلى وجود شبكات غنية من الشعيرات الدموية، وإلى الميتوكوندريا، أو الميوجلوبين — التي هي لوازم التنفس الهوائي — وهذا يكسبها لونًا يغلب عليه البياض، وهو ما يتصف به اللحم الأبيض. بينما تُوجَد الألياف بطيئة الانقباض أساسًا في اللحم الأحمر، وتعتمد على

التنفس الهوائي (بالميوسينات الأكثر بطئًا). وهي تنقبض ببطء أكثر ولكنها لا تتعب بسهولة.

(٥) هذا تبسيط طفيف حقًّا؛ إذ تكون التسلسلات الجينية متطابقة بنسبة ٨٠ بالمائة، ولكن تسلسل الأحماض الأمينية في البروتين يكون متطابقًا بنسبة ٩٥ بالمائة. وهذا ممكن لأن هناك طرقًا عدة من تشفير نفس الحمض الأميني (انظر الفصل الثاني). ويعكس التناقض وجود طفرات منتظمة في التسلسل الجيني، علاوة على عملية انتقاء قوي من أجل الحفاظ على التسلسل البروتيني الأصلي. وتكون التغيرات الوحيدة تقريبًا في التسلسل الجيني التي تسمح بها عملية الانتقاء هي تلك التي لا تغير هوية الأحماض الأمينية في السلسلة. وهذه مجرد علامة صغيرة أخرى على الصورة التي تؤدي بها عملية الانتقاء مهمتها.

(٦) بالطبع إن هذه التغيرات حدثت بالفعل على نحوٍ معكوس؛ فصارت العوامل المحركة العملية في نهاية الأمر هي الشعيرات السميكة في العضلة. ولعل هذا يفسر السبب في أن كل جزيء ميوسين لا يزال لديه رأسان في العضلة، وإن كانا لا يتسقان معًا، على ما يبدو، بشكل مفيد.

(٧) يمكن أن تتحرك البكتيريا أيضًا باستخدام سوط مميز، يختلف كثيرًا عن أي شيء معروف في الخلايا حقيقية النوى. وحركته أساسًا تشبه حركة بريمة صلبة، تدور حول محولها بمحرك بروتيني. وكثيرًا ما يُوصَف السوط البكتيري كمثال للتعقيد غير القابل للتبسيط، ولكن هذا الرأي نُوقِش بتوسع في مواضع أخرى مما يجعلني لا أنوي التعرض له هنا. فإذا أردت المزيد عن السوط البكتيري فيُرجى منك قراءة كتاب «السوط مفرودًا» لكين ميلر، وهو عالم بارز في الكيمياء الحيوية، وشديد الانتقاد لما تُسمَّى حركة التصميم الذكي، وكاثوليكي ملتزم. وهو لا يرى تعارضًا بين الاعتقاد أن التفاصيل الجزيئية للحياة يفسرها التطور وبين الإيمان بالله. ومع ذلك فإنه ينبذ مؤيدي حركة التصميم معتبرًا إياهم في حالة فشل مزدوج؛ «فالعلم يرفضهم لأنهم لا يتواءمون مع الحقائق، كما فشلوا دينيًّا لأنهم لا يذكرون الرب إلا قليلًا.»

(٨) هي بالتحديد بروتينات G، وهي عائلة من «مفاتيح التحويل» الجزيئية المختصة بأعمال الإشارات الخلوية. ونظراؤها في البكتيريا هي عائلة كبيرة من بروتينات جي تي باز. الأسماء نفسها ليست مهمة، ويكفينا أن نقول إن أسلاف البروتينات معروفة.

(٩) ثمة مثال أقل فائدة يُسمَّى الاعتلال المخي الإسفنجي، والمعروف بمرض جنون البقر. وهو مرض معد تنتقل عدواه البريونات، وهذه بدورها بروتينات تعمل كجسيمات

معدية تؤدي إلى تغيير تركيب البروتينات الملاصقة لها. وتتبلمر البروتينات المتغيرة إلى لييفات طويلة، وبتعبير آخر فهي تكون نوعًا من الهيكل الخلوي. وبالرغم من افتراض أن تلك البروتينات ضارة، فإن هناك بحثًا حديثًا يفيد أن بروتينات شبيهة بالبريونات ربما تلعب دورًا في تكوين الذاكرة طويلة الأمد عند التشابكات العصبية بالمخ.

الفصل السابع: الإبصار

(١) من الحوادث التي نالت بعض الشهرة في مدرستي القديمة في كامبريدج تلك الخاصة بطالب شارك في سباق للزوارق بين كامبريدج وأكسفورد. كانت مهمته توجيه دفة القارب، فحدث أن وجَّهَ قارب كامبريدج بحيث اتَّجَه مباشرةً نحو مركب ضخم واصطدم به، فغرق القارب الصغير بطاقمه عديم الحيلة. وقد برَّرَ فيما بعد فعلته بقوله إن المركب الضخم كانت صورته عند النقطة العمياء لشبكية عينيه فلم يَرَه.

(٢) «أستطيع أن أرى أنه إن لم يكن ساخطًا حقًّا، فإنه كان بعيدًا عن أن يكون راضيًا حقًّا.»

(٣) هل تعلم، على سبيل المثال، أن معظم الثدييات (بخلاف الرئيسيات) ليست لأعينها القدرة على التكيُّف، بمعنى أن تضبط بؤرة الصورة على شبكية العين من المسافة البعيدة إلى المسافة القريبة؟ فهذه مزية إضافية.

(٤) انقرضت قواقع الأمونيت مع الديناصورات تاركة أصدافها الخارجية الحلزونية الرائعة وراءها كحفريات في صخور العصر الجوراسي. وعيِّنتي المفضلة مطمورة في صخرة ناتئة من الهضاب الشاطئية البحرية قرب بلدة سوانادج بمنطقة دورست البريطانية، وهي عسيرة المنال لمتسلق للجبال مُسِنٍّ مثلي.

(٥) الخطوة الأخيرة في عملية تطوُّر عين حيوان ثلاثي الفصوص، التي لم يتضمَّنها الشكل ٧-٢، هي تكرار السطيحات التي تكوَّنَتْ بالفعل لتكوين عين مركبة. وهذه ليست مشكلة؛ فالحياة تُجِيد تكرار الأجزاء الموجودة فعلًا.

(٦) مثالي المفضل في هذا الصدد هو تلك الدودة المفلطحة الطفيلية الضئيلة المسماة إنتوبديلا سولياي، التي لها عدسة عينية مكوَّنة من الميتوكوندريا الملتحمة معًا. تعمل الميتوكوندريا في حالتها العادية «محطات لتوليد الطاقة» في الخلايا المعقدة؛ إذ تولِّد كل الطاقة التي نحتاجها لنعيش، وبالتأكيد ليست لديها أي خصائص بصرية خاصة. وتُوجَد بالفعل ديدان مفلطحة أخرى لديها عدسات عينية مكوَّنة من مجموعات من

الميتوكوندريا التي لم تلتحم حتى معًا. ويبدو أن ذلك التجمع من المكونات الخلوية العادية يكسر الضوء بدرجة تكفي لأداء بعض الفائدة للكائن.

(٧) كان فريق معامل بِل مهتمًّا بالفعل بالإنتاج التجاري لمجموعات من العدسات الدقيقة لتُستخدَم في أجهزة إلكترونية وبصرية. وبدلًا من أن يُجرِّب هذا الفريق تجهيز تلك المجموعات بأشعة الليزر، وهو الأسلوب التكنولوجي العادي المنتشر والمتصف بالعيوب، فإنهم اتبعوا دروس علم الأحياء؛ فاستخدموا أسلوب المحاكاة البيولوجية وتركوا الطبيعة تؤدِّي مهمتها بدلًا منهم. وقد نُشِرَ تقرير عن نجاحهم هذا بمجلة «ساينس» في عام ٢٠٠٣.

(٨) كان العالم الراحل السير إريك دنتون رئيس معمل جمعية علم الأحياء البحرية في بلايموث قد أدلى يومًا بتصريح مختلف قال فيه: «حينما تحصل على نتيجة جيِّدة، فاحصل على وجبة غداء جيِّدة قبل أن تكرِّر التجربة. فحينئذٍ ستكون على الأقل قد تناولت غداءً جيِّدًا.»

(٩) الشخص دقيق الملاحظة، أو من يعلم تلك المعلومة مسبقًا، سيلاحظ أن المخاريط المختصة باللون الأحمر تمتص الضوء بحد أقصى عند ٥٦٤ نانومترًا، وهذا لا يدخل ضمن نطاق اللون الأحمر من الطيف، لكنه يقع في الجزء الأخضر المصفر منه. واللون الأحمر بكل ما يتميَّز به من حيوية هو شيء مختلق من نسج الخيال؛ فنحن «نرى» اللون الأحمر حينما يتولَّى المخ تمثيل المعلومات الصادرة من مخروطين مختلفين، فلا تأتي إشارة مطلقًا من مخروط اللون الأخضر، بينما تأتي إشارة متضائلة من مخروط اللون الأخضر المصفر. وهذا يظهر لك قوة التخيل. وفي المرة القادمة حين تتجادل مع زوجتك عما إذا كانت درجتان غير متماثلتين من اللون الأحمر تتوافقان أم لا، فذكِّرها بأنه لا يُوجَد جواب واحد صحيح، وأنها مخطئة بالتأكيد.

(١٠) كما يعرف كل مصوِّري المشاهير (الباباراتزي)، كلما كبرت العدسة في الحجم كانت الرؤية أفضل، ونفس الشيء ينطبق على العيون. ومن الواضح أن العكس صحيح أيضًا، وهو ما يضع حدًّا أدنى لمدى صغر العدسة يقترب من حجم إحدى سطيحات العين المركبة للحشرة. ولا تتعلق المشكلة بحجم العدسة فحسب، ولكن بالطول الموجي للضوء أيضًا؛ فالأطوال الموجية الأقصر تعطي وضوحًا أفضل للصورة. ولعل هذا يُفسِّر السبب في أن الحشرات حتى يومنا هذا، كما كانت الفقاريات الأولى (الصغيرة) في الزمن الماضي، ترى الأشياء بالأشعة فوق البنفسجية؛ إذ تعطي تلك الأشعةُ وضوحًا أفضل

للصورة في العيون الصغيرة. أما نحن البشر فلا نحتاج إلى هذا لأن لدينا عدسة عينية أكبر؛ ومن ثم يمكننا تحمُّل التغاضي عن ذلك الجزء المُضِرِّ من الطيف. ومما يثير الاهتمام أن قدرة الحشرات على الرؤية في وجود الأشعة فوق البنفسجية يعني أن بإمكانها إدراك أنماط وألوان تُوجَد في الزهور التي نراها نحن بيضاء فحسب. وهذا يساعدنا في فهم السبب في وجود الكثير من الأزهار البيضاء في هذا العالم؛ فهي تُعتبَر بالنسبة للحشرات التي تُلقِّحها مُزوَّدة بأنماط وألوان مختلفة لا ندركها نحن البشر.

(١١) الرودوبسينات البكتيرية شائعة. ولها بنية تركيبية مشابهة لكلٍّ من الرودوبسينات الطحلبية والحيوانية، وتسلسلاتها الجينية قريبة من الرودوبسينات الطحلبية. وتستخدم البكتيريا تلك المواد كعوامل حساسة للضوء، وأيضًا للحصول على شكل من البناء الضوئي.

الفصل الثامن: الدم الحار

(١) كان كليمنت فرويد حفيدًا لسيجموند فرويد، وسياسيًّا ليبراليًّا لفترة ما. وحينما كان في رحلة رسمية إلى الصين، دُهِشَ لَمَّا وَجَدَ أن زميله الأقل شأنًا مُنِح جناحًا أكبر. وفسَّرَ له المسئولون هذا بقولهم إنه حفيد ونستون تشرشل، وعلَّق فرويد على هذا فيما بَعْدُ قائلًا: «إنها المرة الوحيدة التي كان جَدُّ أحدهم أعظم شأنًا من جدِّي.»

(٢) هذا ليس صحيحًا تمامًا. فالحيوانات الأكبر حجمًا تنتج حرارة أقل، لكل رطل من أوزانها، من الحيوانات الصغيرة، أي إن معدل الأيض يقل كلما زاد الحجم. وهناك خلاف بشأن أسباب ذلك ولن أخوض فيها هنا. ومن يرغب في الحصول على شرح وافٍ فعليه أن يرجع إلى كتابي «القدرة والجنس والانتحار: الميتوكوندريا ومعنى الحياة». يكفي أن نقول إن الحيوانات الكبيرة تحتفظ بالفعل في أجسامها بالحرارة أفضل من الحيوانات الصغيرة، حتى وإن كانت تُولِّد حرارة أقل لكل رطل.

(٣) مع الاعتذار لأسطورة أغاني البلوز هاولين وولف الذي غنَّى قائلًا: «بعض الناس خُلِقوا على هذا الشكل، والبعض الآخر على ذاك. ولا ينبغي أن يَصِفني أحدٌ بأنني سمين؛ لأنني خُلِقْتُ بما يناسب حياة الراحة، وليس الجري السريع.»

(٤) إذا كنت تجد صعوبة في فهم كيفية انتقاء كل هذه الصفات الوراثية دفعة واحدة؛ فانظر حولك فحسب. فبعض الناس تجدهم متسمين بأجساد رياضية أفضل من غيرهم؛ فنسبة ضئيلة من الأشخاص يتمتَّعون بقوام أوليمبي. وقد لا ترغب في تجربة

الأمر على نفسك، ولكن من شأن برنامج لتزويج ذوي الجسم الرياضي بغيرهم من ذوي الجسم الرياضي، وانتقاء أنسبهم وأفضلهم فقط أن ينجح بشكل يكاد يكون مؤكدًا في إنتاج رياضيين متفوقين. وقد أُجْرِيَتْ تجارب من هذا النوع على الفئران لدراسة الداء السكري، وتم تحسين «القدرة الهوائية» بنسبة ٣٥٠ بالمائة على مدى عشرة أجيال (مما قلَّلَ من خطورة المرض السكري). كما عاشت الفئران ستة شهور أطول من المعتاد؛ وهي زيادة عمرية قدرها نحو ٢٠ بالمائة.

(٥) ثمة احتمال يثير الاهتمام، طرحه بقوة كلٌّ من بول إلس وتوني هلبرت من جامعة ولونجونج في أستراليا، يتعلَّق بالتركيب الدهني للأغشية الخلوية؛ إذ يتطلب معدَّلُ الأيض السريع المرورَ السريعَ للمواد عَبْر تلك الأغشية، وهذا بصفة عامة يحتاج إلى وجود نسبة عالية نسبيًّا من الأحماض الدهنية متعددة اللاتشبُّع التي تُسبِّب سلاسلها الملتوية قَدْرًا أكبر من السيولة، وهو الفارق بين الشحوم الجامدة والزيوت السائلة. فإذا تم انتقاء بعض الحيوانات لما تتمتع به من قدرة هوائية عالية، فإنها تَمِيل لأن يكون لديها المزيد من الأحماض الدهنية متعددة اللاتشبُّع، وقد يحثُّ وجود هذه الأحماض في الأعضاء الحشوية على رفع معدل الأيض عند الراحة أيضًا. عيب هذا الأمر هو وجوب تغيير تركيب الأحماض الدهنية للأغشية الخلوية في الأنسجة المختلفة، وهذا يحدث بالتأكيد إلى حدٍّ ما. ومن ثم فأنا غير مقتنع بأنه يحل المشكلة تمامًا، كما أنه لا يفسر السبب في وجوب وجود المزيد من الميتوكوندريا في الأعضاء الحشوية لذوات الدم الحار. وهذا يوحي بأنه قد تَمَّ انتقاء صفة ارتفاع معدل الأيض قصدًا في هذه الأعضاء، وليس الأمر متعلقًا بتركيب دهني غير مقصود.

(٦) ساعد اكتشاف حفرية لأحد الليستروصورات في القارة القطبية الجنوبية على يد العالم إدوين كولبرت في عام ١٩٦٩ على تأكيد نظرية كانت موضع خلاف في ذلك الحين عن الصفائح التكتونية؛ إذ تَمَّ بالفعل العثور على الليستروصورات في جنوب أفريقيا والصين والهند. فكان الاعتقاد أن القارة القطبية الجنوبية كانت عائمة في نفس تلك المناطق أكثر معقولية من أن الليستروصورات الثقيلة سبحت مسافات طويلة.

(٧) تقول الفكرة الأساسية التي أدلى بها ريتشارد بروم بجامعة ييل إن الريش أنبوبي أساسًا. وهذه الأنابيب في الريش مهمة من الناحية الجنينية؛ لأن لها محاور عدة: لأعلى وأسفل، وبالعرض، وللداخل والخارج. وهذه المحاور تُولِّد تدرجات كيميائية حيوية أثناء تغلغل الجزيئات الإشارية فيها. وهذه التدرجات بدورها تنشط جينات مختلفة على

طول هذه المحاور. تلك الجينات التي تتحكم في التطور الجنيني والأجسام الحيوانية أيضًا يعتبرها علماء الأجنة في صورة «أنابيب» أساسًا.

(٨) باعتباري مدخنًا سابقًا ومتسلقًا للجبال في ماضي حياتي، فأنا ألهث طلبًا للهواء في مختلف المناطق المرتفعة عن سطح البحر، ويمكنني أن أتخيَّل ما يمكن أن تشعر به الطيور إذا كانت تدخن وهي تطير؛ فلا بد أن يكون تأثير التنفس المستمر للدخان، ومعدل سحب الهواء المرتفع مسببًا للدوار.

(٩) يوحي حجم جماجم الثيروبودات بأن كانت لديها مخاخ كبيرة، ولعل هذا أُتِيحَ لها بفضل ارتفاع معدل الأيض لديها. إلا أن كبر حجم المخ أمر يصعب القطع به؛ لأن الكثير من الزواحف لا تمتلئ جماجمها بالمخاخ. وتوحي الفحوص التي أُجْرِيَتْ على الجماجم الثيروبودية بأن الأوعية الدموية المغذية للمخ كانت ملاصقة لعظم الجمجمة؛ مما يشير إلى أن المخ كان يملأ تجويف الجمجمة، ولكن هذا ليس قطعيًّا تمامًا. وهناك طرق أخرى لتكوين مخ كبير تقل في تكلفتها عن جعل الحيوان من ذوات الدم الحار؛ فلا يُوجَد إذن ارتباط ضروري.

(١٠) الدليل على كل ذلك محفوظ في الصخور على صورة «توقيعات متناظرة». ولمن يرغب في معرفة المزيد، أُوصِي بقراءة مقالة كتبتُها لمجلة «نيتشر» عن هذا الموضوع بعنوان «قراءة كتاب الموت»، (يوليو، ٢٠٠٧).

الفصل التاسع: الوعي

(١) يقول مايكل جاتسانيجا في كتابه «العقل الاجتماعي»، إن أستاذه روجر سبيري كان قد عاد من مؤتمر بالفاتيكان؛ وصرَّح بأن البابا قال له ما معناه: «يمكن للعلماء أن يمتلكوا المخ، أما الكنيسة فلديها العقل.»

(٢) إنني أستخدم كلمات مُعَبِّرة عن فكرة الازدواجية — مفترضًا وجود تفرقة بين العقل والمخ — وإن كنت لا أظن أن هناك فارقًا بينهما، وهذا للتأكيد على أن هذه الازدواجية محفورة بعمق في اللغة، وأيضًا لأن هذا يعكس الصعوبة التفسيرية. فإذا كان العقل والمخ شيئًا واحدًا، فلا بد أن نُفسِّر السبب في أنهما لا يبدوان هكذا. ولا يكفي أن نقول: «إن الأمر مجرد وهم!» فهذا لا يصلح. فما هو إذن الأساس الجزيئي للوهم؟

(٣) خَسِرَ كمبيوتر «الأزرق العميق» الأصلي سلسلةً من المباريات أمام جاري كاسباروف في عام ١٩٩٦، وإن كان قد فاز في مباراة واحدة. ويُوجَد طراز حديث،

يُعرَف بصفة غير رسمية باسم «الأزرق الأكثر عمقًا» هزم كاسباروف في سلسلة أخرى عام ١٩٩٧، ولكن قال كاسباروف إنه كان يجد «ذكاءً وإبداعًا عميقين» في نقلات الكمبيوتر، واتهم شركة آي بي إم بالغش. من ناحيةٍ أخرى، إذا كان بإمكان عدد من مبرمجي الكمبيوتر أن يتغلَّبوا على أحد عباقرة الشطرنج، فإن تداعيات ذلك تُعَدُّ سيئة بنفس الدرجة؛ فهذا يعني أن هناك لجنة من العباقرة هي مَنْ هزمَتْه.

(٤) لكل من يهتم بمعرفة المزيد عن هذه الحالات الغريبة، أوصيه بقراءة كتب في إس راما شاندران الشيقة، والمتعمقة في علمَي الأعصاب والتطور.

(٥) تُعتبَر التذبذبات تغيُّرات إيقاعية في النشاط الكهربائي للخلايا العصبية المفردة، وإذا عملت معًا في تناغم أمكن التقاطها بجهاز تخطيط كهربية الدماغ. وحينما تطلق خلية عصبية نبضاتها يحدث لها إزالة استقطاب، بمعنى أنه يحدث تبدُّد جزئي لشحنة الغشاء الخلوي، مع اندفاع أيونات مثل الصوديوم والكالسيوم إلى داخل الخلية. وإذا كان إطلاق النبضات العصبية عشوائيًّا ومتقطعًا، فمن الصعب التقاط أي شيء بجهاز تخطيط كهربية الدماغ، ولكن إذا حدثت إزالة استقطاب لأعداد كبيرة من الخلايا العصبية في المخ ثم أُعِيدَ استقطابها في موجات إيقاعية، فإن تأثيرات ذلك يمكن التقاطها كموجات مخية بجهاز تخطيط كهربية الدماغ. وتعني الذبذبات في نطاق ٤٠ هرتز أن الكثير من الخلايا العصبية تطلق نبضاتها في تزامن كل ٢٥ ملي ثانية تقريبًا.

(٦) التشابكات العصبية هي فجوات ملتحمة دقيقة بين الخلايا العصبية، وهي تقطع — فيزيائيًّا — مرور النبضة العصبية (بمعنى أنها تعوق عملية انطلاق النبضات). تنطلق عوامل كيميائية تُسمَّى النواقل العصبية حينما تصل نبضة عصبية إلى أحد تلك التشابكات. وهي تنتشر عَبْرَ الفجوة ثم ترتبط بمستقبلات على الخلية العصبية التالية للتشابك، فإما أن تنشِّط تلك الخلية وإما أن تثبطها، أو تعمل على إحداث تغيرات أطول أمدًا تقوِّي التشابكات أو تُضْعِفها. وتدخل عملية تكوين تشابكات جديدة أو تغيير التشابكات الموجودة في تشكيل الذكريات وفي التعلم، وإن كان الكثير من الآليات التفصيلية لذلك الأمر لم يُكتشَف بَعْدُ.

(٧) هناك حتى أدلة وجيهة على أن الوعي يتكوَّن من «صور ثابتة» بطريقة تشبه الفيلم السينمائي بدرجة كبيرة. وهذه الصور يمكن أن تتفاوت في مدتها من بضع عشرات من الملي ثانية إلى مائة ملي ثانية أو أكثر. كما أن تقصير مُدَد هذه الصور أو إطالتها — تحت تأثير الانفعالات، على سبيل المثال — قد يكون السبب في أن الزمن يبدو

كأنه أبطأ أو أسرع تحت ظروف مختلفة. وهكذا يمكن أن يبطئ الزمن لخمسة أضعاف إذا تكوَّنت الصور كل ٢٠ ملي ثانية بدلًا من كل ١٠٠ ملي ثانية. فيمكننا حينئذٍ أن نرى يدًا تمسك سكينًا؛ تتحرك بالسرعة البطيئة.

(٨) المادة المظلمة هي مادة الوعي، وتُوصَف بأنها مثل «الغبار» الذي في ثلاثية الروائي فيليب بولمان «مواده المظلمة»، وأفترضُ هذا تقديرًا مني لما يُسمَّى «الغبار الذهني» لويليام جيمس.

الفصل العاشر: الموت

(١) من الناحية التقنية، لدى البكتيريا والنباتات إنزيمات تُسمَّى «الميتاكاسباز»، وليست إنزيمات كاسباز الحقيقية، إلا أن تلك الميتاكاسبازات هي السابقات التطورية للكاسبازات التي تُوجَد في الحيوانات وتخدم أغراضًا مماثلة. وللتبسيط أقول إنني سأسميها جميعًا باسم إنزيمات الكاسباز. ولمزيد من التفاصيل اقرأ مقالي بمجلة «نيتشر» بعنوان «منشأ الموت»، (مايو، ٢٠٠٨).

(٢) التسلسلات الإنزيمية مهمة في الخلايا؛ لأنها تضخم الإشارة الصغيرة منذ بدايتها. وتخيَّلْ أن يتمَّ تنشيط أحد الإنزيمات، وهذا بدوره ينشِّط عشرة إنزيمات مستهدفة، وكلٌّ منها ينشِّط عشرة إنزيمات أخرى. فيكون لدينا الآن مائة من الإنزيمات النشطة. فإذا نشط كلٌّ منها عشرة إنزيمات مستهدفة يكون لدينا ألف، ثم عشرة آلاف ... وهكذا. ويستغرق كل تسلسل ست خطوات فقط من أجل تنشيط مليون إنزيم من إنزيمات الإعدام التي تمزق الخلية تمزيقًا.

(٣) كان ثمة أسباب أخرى، بالطبع، تضع حقيقيات النوى على الطريق إلى التعدد الخلوي — بينما لم تتطور البكتيريا لما بعد مرحلة المستعمرات — ولا سيما ميل الخلايا حقيقية النوى إلى النمو لأحجام أكبر وتكديس الجينات. وتُعَدُّ الأسباب التي وراء هذا التطور موضوعًا رئيسيًّا في كتابي: «القدرة والجنس والانتحار: الميتوكوندريا ومعنى الحياة».

(٤) لا أعرف ما إذا كنت أحمل أيًّا من جينات ApoE4، ولكن في ضوء الأمراض التي تنتشر في عائلتي لن أندهش تمامًا إذا اكتشفت أن لديَّ واحدًا منها على الأقل. ولهذا السبب لا أحرص على معرفة هذا الأمر، وأحرص بدلًا من هذا على ممارسة الرياضة.

(٥) أطلق كيركوود على نظريته اسم «نظرية الجسد القابل للتخلص منه»، معيدًا للأذهان الغرض من مشروع فايسمان؛ إذ تكون الخلايا الجسدية خاضعة للخلايا الجنسية، حسبما يقول كيركوود وفايسمان في تناغم، ويُعتبَر السالمون الباسيفيكي حالة نموذجية لهذه النظرية.

(٦) قد تكون هناك بعض المثالب غير المتوقعة. على سبيل المثال هناك رجل أخضع نفسه لنظام غذائي صارم من تقييد السعرات، ثم انكسرت ساقه إثر سقطة طفيفة. كان مصابًا بحالة خطيرة من هشاشة العظام، وقد حذَّرَه طبيبه، بحق، من هذا النظام الغذائي.

(٧) أقول لأولئك الذين يريدون حقًّا أن يعرفوا كيف يمكن أن يكون أحد الجزيئات «حساسًا» لوجود المواد الغذائية أو غيابها: إن الجين SIRT-1 يرتبط بالصورة «المستنزَفة» من أحد الإنزيمات المساعدة التنفسية الذي يُعرَف باسم NAD، والذي لا يتراكم في الخلية إلا حينما يحدث استنزاف لمواد مهمة كالجلوكوز. ويُعتبَر الجين TOR حساسًا لعمليات الأكسدة والاختزال، بما يعني أن نشاطه يختلف تبعًا لحالة الأكسدة في الخلية، وبما يعكس مجددًا حالة وجود المواد الغذائية أو عدم وجودها.

(٨) أوردنا سابقًا ملاحظة عن مقايضة أخرى ممكنة؛ وهي مرض السرطان في مقابل المرض التنكسي. فالفئران التي لديها جين زائد من نوع SIRT-1 تظهر عليها أمارات صحة أفضل، ولكنها لا تعيش أطول. بل إنها غالبًا ما تموت بالسرطان. وهي عملية مقايضة غير مواتية.

(٩) «الساعات العمرية» الأخرى المفترضة، مثل طول التيلوميرات (وهي الأغطية الطرفية الموجودة عند نهاية الكروموسومات، والتي تَقْصُر مع كل انقسام للخلية) لا ترتبط مع الأعمار في الأنواع المختلفة من الكائنات. ومع أن الارتباط لا يثبت وجود السببية، فإنها نقطة ابتداء جيدة لهذا الموضوع. وعدم وجود ارتباط يثبت عدم وجود السببية إلى حدٍّ ما. وسواء أكانت التيلوميرات هذه تحمي من السرطان عن طريق إعاقة الانقسام الخلوي اللامحدود أم لا، فهذا موضع نقاش، ولكنها بالتأكيد لا تحدِّد العمر.

(١٠) إن ضرب بضعة أمثلة لا بد أن يوضِّح المعنى الذي أقصده؛ فأنا لا أتكلم عن نوع الالتهاب الحاد الذي نراه في جرح قطعي ملتهب مثلًا. ولكني أتحدث عن التهابات مزمنة. على سبيل المثال، التصلب العصيدي الشرياني يستتبع وجود تفاعل التهابي مزمن للمواد المتراكمة في الصُّفَيْحَات الشريانية، ويزيد الالتهاب المستمر هذه العملية تدهورًا.

وكذلك مرض ألزهايمر تدفعه حالة تفاعل التهابي مستمر للصُّفَيْحَات النشوانية في المخ، والانحلال البقعي في سن الشيخوخة يتضمن التهابًا للأغشية الشبكية؛ مما يؤدي إلى تنامي أوعية دموية جديدة داخل الشبكية والعمى كنتيجة نهائية. ويمكنني أن أستمر في ضرب الأمثلة؛ مثل: الداء السكري، والسرطان، والالتهاب المفصلي، والتصلب المتعدد، وغير ذلك. ويُعتبَر الالتهاب المزمن المعتدل هو القاسم المشترك. والتدخين يدفع إلى حدوث هذه الأمراض، ويحدث أغلب هذا عن طريق مفاقمة الالتهاب. وعلى العكس من هذا، فإن إعاقة الجين TOR تحث على حدوث تثبيط طفيف للمناعة، كما رأينا سابقًا، وقد يساعد هذا على الحد من الالتهاب.

(١١) ترجع فكرة التحويل الحالِّ للسكر إلى العالم أوتو فاربورج في عقد الأربعينيات من القرن العشرين، ولكن تم إثباتها مؤخرًا. ونقول كقاعدة عامة إن الخلايا التي يمكنها الاستغناء في نشاطها عن الميتوكوندريا هي وحدها التي تنقلب إلى خلايا سرطانية. وهذا ينطبق بالدرجة الأكبر على الخلايا الجذعية، التي لا تعتمد إلا قليلًا على الميتوكوندريا وغالبًا ما تنخرط في عملية تكوين الأورام. وكأمثلة أخرى هناك خلايا الجلد، وخلايا الرئتين، وخلايا الدم البيضاء. وكلها مستقلة نسبيًّا عن الميتوكوندريا، وترتبط جميعًا بنشوء الأورام.

(١٢) على حدِّ قول جوستافو بارخا، فإن الحقيقة القائلة إن عملية التطور يمكن أن تطيل العمر أضعافًا مضاعفة تعني ضمنًا أن إطالة عمر الإنسان على نحوٍ كبير مهمة قابلة للتنفيذ، كل ما في الأمر أنها تحتاج جهدًا شديدًا.

مصادر الصور

(١-١) أُعِيدَ نشر الصورة بتصريح من ديبورا إس كيلي وجمعية علوم المحيطات (مجلة أوشَنوجرافي، المجلد ١٨، العدد ٣، سبتمبر ٢٠٠٥).

(١-٢) أُعِيدَ نشر الصورة بتصريح من ديبورا إس كيلي وجمعية علوم المحيطات (مجلة أوشَنوجرافي، المجلد ١٨، العدد ٣، سبتمبر ٢٠٠٥).

(١-٣) أُعِيدَ نشر الصورة بتصريح من ديبورا إس كيلي وجمعية علوم المحيطات (مجلة أوشَنوجرافي، المجلد ٢٠، العدد ٤، ديسمبر ٢٠٠٧).

(٣-١) أُعِيدَ نشر الصورة بتصريح من ديفيد إيه ووكر. «المخطط Z؛ الهبوط لأسفل»، دورية تريندس إنْ بلانت ساينسيس، المجلد ٧، صفحات ١٨٣–١٨٥، ٢٠٠٢.

(٣-٢) إهداء من الأستاذ كلاوس كواليك، جامعة دوسلدورف.

(٣-٣) إهداء من دكتورة كاثرين كولاس دي فرانكسمول، جامعة غرب أستراليا.

(٣-٤) أُعِيدَ رسم الصورة من: يانو جيه وآخرين، «عندما يتأكسد الماء إلى ثنائي الأكسجين: بنية عنقود Mn4Ca الخاص بالبناء الضوئي»، مجلة ساينس، المجلد ٣١٤، صفحة ٨٢١، ٢٠٠٦.

(٤-٤) أُعِيدَ رسم الصورة من: ريفيرا إم سي، وليك جيه إيه، «حلقة الحياة تُقدِّم أدلة على أصل الاندماج الجيني لحقيقيات النوى»، مجلة نيتشر، المجلد ٤٣١، صفحات ١٥٢–١٥٥، ٢٠٠٤.

(٤-٥) إهداء من كارول فون دولِن، جامعة ولاية يوتا.

(٤-٦) أُعِيدَ نشر الصورة بتصريح من بيل مارتن: «العتائق وأصل نواة حقيقيات النوى»، دورية كَرَنت أوبينيون إنْ ميكروبولوجي، المجلد ٨، صفحات ٦٣٠–٦٣٧، ٢٠٠٥.

(٦-١) إهداء من الأستاذ روجر كريج، جامعة ماساتشوستس.

(٦-٢) إهداء من دكتور ديفيد جودسيل، معهد سكريبس للأبحاث بسان دييجو.

(٦-٣) أُعِيدَ نشر الصورة بتصريح من هيو هاكسلي: ناكمياس في تي، وهاكسلي إتش إي، وكيسلر دي، «مشاهدات المجهر الإلكتروني حول عينات الأكتوميوسين والأكتين من فيساروم بوليسيفالوم، وحول تفاعلها مع الجزء الفرعي ١ الثقيل من الميروميوسين من ميوسين العضلة»، دورية موليكيولَر بيولوجي، المجلد ٥٠، صفحات ٨٣–٩٠، ١٩٧٠.

(٦-٤) إهداء من دكتور مارك كريجان، جامعة ويستمنستر.

(٧-١) إهداء من باتريك بريان، معهد البحوث الفرنسي لاستكشاف البحار.

(٧-٢) أُعِيدَ نشر الصورة بتصريح من دان إريك نيلسون: مايكل لاند ودان إريك نيلسون، «عيون الحيوانات»، أوكسفورد يونيفرسيتي برِس، أوكسفورد، ٢٠٠٢.

(٧-٣) إهداء من الأستاذ إيوان كلاركسون، جامعة إدنبرة.

(٧-٤) إهداء من الأستاذة جوانا آيزنبيرج، جامعة هارفرد.

(٧-٥) أُعِيدَ نشرها بتصريح من أدادي إل ووايِنر إس، «مبادئ التحكم في التمعدن البيولوجي وتصميمه»، دورية أنجفانت شيمي، الطبعة الإنجليزية، المجلد ٣، صفحات ١٥٣–١٦٩، ١٩٩٢، جميع الحقوق محفوظة لصالح وايلي في سي إتش فيرلاج ذات المسئولية المحدودة وشركاه. كيه جي إيه إيه.

(٧-٦) إهداء من الأستاذ فالتر جيرنج، بيوزينتروم، جامعة بازل، سويسرا.

(٨-١) أُعِيدَ رسم الصورة من: رييس إس وآخرين، «جهاز المناعة المرتبط برئات الطيور: مراجعة»، دورية فيتريناري ريسيرتش، عدد ٣٧، صفحات ٣١١–٣٢٤، ٢٠٠٦.

(٨-٢) إهداء من زينا دِريتسكي، مؤسسة العلوم الوطنية، أرلينجتون، فيرجينيا، الولايات المتحدة الأمريكية.

(٩-١) من البرنامج التعليمي للكلية الأمريكية لعلم الأشعة (الإصدار الثاني لقسم علم الأشعة العصبية)، حقوق النشر محفوظة لعام ٢٠٠٤. أُعِيدَ نشر الصورة بتصريح

من الكلية الأمريكية لعلم الأشعة. لا يُصرَّح بنشر أي نسخ أخرى من هذه المادة دون إذنٍ خطيٍّ صريح من الكلية الأمريكية لعلم الأشعة.

(٩-٢) نُشِرَت الصورة بتصريح من والدة نيكي، لين تريس.

ثبت المراجع

I have written *Life Ascending* mostly from primary sources, but the books highlighted below were all sources of insight and enjoyment for me. I don't agree with everything in all of them, but that is part of the pleasure of a good book. Most are written for the general reader and are original scientific works in the tradition of *The Origin of Species* itself. Alphabetical order.

David Beerling *The Emerald Planet* (OUP, 2006). A splendid book on the impact of plants on the history of our planet. Colourful extended vignettes of evolution.

Susan Blackmore *Conversations on Consciousness* (OUP, 2005). An admirably level-headed attempt to canvas and make sense of the conflicting views of leading scientists and philosophers on consciousness.

Jacob Bronowski *The Ascent of Man* (Little, Brown, 1974). The book of the TV series. Magnificent.

Graham Cairns-Smith *Seven Clues to the Origin of Life* (CUP, 1982). Scientifically an old book now, but unequalled for its Sherlock Holmesian. examination of the clues at the heart of life's chemistry.

______, *Evolving the Mind* (CUP, 1998). An excellent and unusual defence of quantum theories of consciousness from a determinedly individual thinker.

Francis Crick *Life Itself* (Simon & Schuster, 1981). An indefensible hypothesis defended by one of the finest scientific minds of the twentieth century. Dated, but still worth a read.

Antonio Damasio *The Feeling of What Happens* (Vintage Books, 2000). One of several books by Damasio, all well worth a read. Poetic and intense; at its best on neurology, and weakest on evolution.

Charles Darwin *The Origin of Species* (Penguin, 1985). Among the most important books ever written.

Paul Davies *The Origin of Life*. (Penguin, 2006). A fine book, if perhaps prone to see too many obstacles.

Richard Dawkins *Climbing Mount Improbable* (Viking, 1996). One of surprisingly few popular books to deal explicitly with the evolution of complex traits like eyes, in Dawkins' inimitable style.

______, *The Selfish Gene* (OUP, 1976). One of the defining books of our age. A must-read.

Daniel Dennett *Consciousness Explained* (Little, Brown, 1991). A controversial classic that can't be ignored.

Derek Denton *The Primordial Emotions* (OUP, 2005). An eloquent book with an important thesis, all the better for its excellent discussions of the work of other researchers and philosophers.

Christian de Duve *Singularities* (CUP, 2005). A densely argued book, encapsulating much of de Duve's clear thinking. Not for the chemically faint-hearted, but the distillations of a fine mind.

______, *Life Evolving* (OUP, 2002). An elegiac book on the biochemical evolution of life and our place in the universe. It reads like a swan song, but in fact precedes *Singularities*.

Gerald Edelman *Wider than the Sky* (Penguin, 2004). A slim but dense volume, and a good introduction to Edelman's important ideas.

Richard Fortey *Trilobite!* (HarperCollins 2000). A delight, as are all Fortey's books, and especially good on the evolution of the trilobites' crystal eye.

Tibor Ganti *The Principles of Life* (OUP, 2003). An original take on the fundamental make-up of life, if lacking in real-world biochemistry. I reluctantly did not discuss his ideas.

Steven Jay Gould *The Structure of Evolutionary Theory* (Harvard University Press, 2002). A serious work of scholarship, but with flashes of Gould's customary panache; a goldmine of interesting material.

Franklin Harold *The Way of the Cell* (OUP, 2001). A wonderful, insightful book on the cell, full of the poetry of deep science. Not always easy but well worth the effort.

Steve Jones *The Language of the Genes* (Flamingo, 2000). Wonderful introduction to the gene; effervescent.

———, *Almost like a Whale* (Doubleday, 1999). Darwin updated with panache and deep learning.

Horace Freeland Judson *The Eighth Day of Creation* (Cold Spring Harbor Press, 1996). A seminal tome: interviews with the pioneers of molecular biology, at the dawn of an era.

Tom Kirkwood *Time of Our Lives* (Weidenfeld & Nicolson, 1999). One of the best introductions to the biology of ageing, by a pioneer in the field; a humane work of science.

Andre Klarsfeld and Frederic Revah *The Biology of Death* (Cornell University Press, 2004). A thoughtful examination of aging and death, from the point of view of the cell. A rare meld of evolution and medicine.

Andrew Knoll *Life on a Young Planet* (Princeton University Press, 2003). A fine, accessible view of early evolution by one of the leading protagonists. Wise counsel.

Christof Koch *The Quest for Consciousness* (Roberts & Co, 2004). A textbook, and not an easy read, but full of flair and insight. A fine and balanced mind enquiring into the mind.

Marek Kohn *A Reason for Everything* (Faber and Faber, 2004). Short biographies of five British evolutionists, full of eloquence and insight. Very good on the evolution of sex.

Michael Land and Dan-Eric Nilsson *Animal Eyes* (OUP, Oxford, 2002). A textbook on animal optics, accessibly written and conveying well the exuberant ingenuity of evolution.

Nick Lane *Power, Sex, Suicide* (OUP, 2005). My own exploration of cell biology and the evolution of complexity, from the point of view of cellular energy.

______, *Oxygen* (OUP, 2002). A history of life on earth with the gas that made complex life possible, oxygen, taking centre-stage.

Primo Levi *The Periodic Table* (Penguin, 1988). Not really a science book at all, but brimming with poetry, humanity and science. A master literary craftsman.

Lynn Margulis and Dorion Sagan *Microcosmos* (University of California Press, 1997). A fine introduction to the grand scale of the microcosm from one of the iconic figures in biology, no stranger to controversy.

Bill Martin and Miklós Müller *Origin of Mitochondria and Hydrogenosomes* (Springer, 2007). A scholarly multi-author text on a seminal event in evolution: disparate views of the eukaryotic cell.

John Maynard Smith and Eörs Szathmáry *The Origins of Life* (OUP, 1999). A popular reworking of their classic text *The Major Transitions in*

Evolution (WH Freeman/Spektrum, 1995). A major work by great intellects.

John Maynard Smith *Did Darwin get it Right?* (Penguin, 1988). Accessible essays, some on the evolution of sex, by the late guru of evolutionary biologists.

Oliver Morton *Eating the Sun* (Fourth Estate, 2007). A gem of a book, combining a novelist's insight into people and place with a deep feeling for molecules and planets. Especially good on the carbon crisis.

Andrew Parker *In the Blink of an Eye* (Free Press, 2003). Much to savour, despite a rather blinkered view.

Vilayanur Ramachandran *The Emerging Mind* (Profile, 2003). Ramachandran's 2003 Reith lectures, essentially his earlier book *Phantoms in the Brain* in compressed form. An original and imaginative mind at play.

Mark Ridley *Mendel's Demon* (Weidenfeld & Nicolson, 2000). An intellectual treat, lacing its profound material on the evolution of complexity with grave wit.

Matt Ridley *The Red Queen* (Penguin, 1993). A seminal book on the evolution of sex and sexual behaviour; insightful and full of Ridley's trademark flair.

______, *Francis Crick* (HarperPress, 2006). A first-rate biography of one of the most interesting figures in twentieth century science. Nicely nuanced, without ever jeopardising his love of the subject.

Steven Rose *The Making of Memory* (Vintage 2003). A fine book on the neural events underlying memory, at its best on the social framework of science.

Ian Stewart and Jack Cohen *Figments of Reality* (CUP, 1997). An eclectic, witty and erudite look at consciousness. Entertaining and opinionated.

Peter Ward *Out of Thin Air* (Joseph Henry Press, 2006). A serious and original hypothesis about why dinosaurs were dominant for so long. Accessible and compelling.

Carl Zimmer *Parasite Rex* (The Free Press, 2000). A superb book on the importance of parasites, with an excellent section on the role of parasites in the evolution of sex.

المصادر الرئيسية

Francis Crick once complained that 'There is no form of prose more difficult to understand and more tedious to read than the average scientific paper'. He had a point—but he did use the word 'average'. At their best, scientific papers can be pure distillations of meaning, and capable of exercising as much pull on the mind as a work of art. I have tried to limit my list here to papers of that calibre: this is not an exhaustive list, but a selection of the papers that most influenced my thinking in writing this book. I've also added a few general reviews as entrées into the literature. Alphabetical order by chapter.

مقدمة

Russell R. J., Gerike U., Danson M. J., Hough D. W., Taylor G. L. Structural adaptations of the cold-active citrate synthase from an Antarctic bacterium. *Structure* 6: 351–61; 1998.

الفصل الأول: أصل الحياة

Fyfe W. S. The water inventory of the Earth: fluids and tectonics. Geological Society, London, Special Publications 78: 1–7; 1994.

Holm N. G., *et al.* Alkaline fluid circulation in ultramafic rocks and formation of nucleotide constituents: a hypothesis. *Geochemical Transactions* 7: 7; 2006.

Huber C., Wächtershäuser G. Peptides by activation of amino acids with CO on (Ni,Fe)S surfaces: implications for the origin of life. *Science* 281: 670–72; 1998.

Kelley D. S., Karson J. A., Fruh-Green G. L. *et al.* A serpentinite-hosted ecosystem: the Lost City hydrothermal field. *Science* 307: 1428–34; 2005.

Martin W., Baross J., Kelley D., Russell M. J. Hydrothermal vents and the origin of life. *Nature Reviews in Microbiology* 6: 805–14; 2008.

Martin W., Russell M. J. On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 362: 1887–925; 2007.

Morowitz H., Smith E. Energy flow and the organisation of life. *Complexity* 13: 51–9; 2007.

Proskurowski G., *et al.* Abiogenic hydrocarbon production at Lost City hydrothermal field. *Science* 319: 604–7; 2008.

Russell M. J., Martin W. The rocky roots of the acetyl CoA pathway. *Trends in Biochemical Sciences* 29: 358–63; 2004.

Russell M. First Life. *American Scientist* 94: 32–9; 2006.

Smith E., Morowitz H. J. Universality in intermediary metabolism. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 101: 13168–73; 2004.

Wächtershäuser G. From volcanic origins of chemoautotrophic life to bacteria, archaea and eukarya. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 361: 1787–806; 2006.

الفصل الثاني: دي إن إيه

Baaske P., *et al.* Extreme accumulation of nucleotides in simulated hydrothermal pore systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 104: 9346–51; 2007.

Copley S. D., Smith E., Morowitz H. J. A mechanism for the association of amino acids with their codons and the origin of the genetic code. PNAS 102: 4442–7; 2005.

Crick F. H. C. The origin of the genetic code. *Journal of Molecular Biology* 38: 367–79; 1968.

De Duve C. The onset of selection. *Nature* 433: 581–2; 2005.

Freeland S. J., Hurst L. D. The genetic code is one in a million. *Journal of Molecular Evolution* 47: 238–48; 1998.

Gilbert W. The RNA world. *Nature* 319: 618; 1986.

Hayes B. The invention of the genetic code. *American Scientist* 86: 8–14; 1998.

Koonin E. V., Martin W. On the origin of genomes and cells within inorganic compartments. *Trends in Genetics* 21: 647–54; 2005.

Leipe D., Aravind L., Koonin E. V. Did DNA replication evolve twice independently? *Nucleic Acids Research* 27: 3389–401; 1999.

Martin W., Russell M. J. On the origins of cells: a hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic prokaryotes, and from prokaryotes to nucleated cells. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B.* 358: 59–83; 2003.

Taylor F. J. R., Coates D. The code within the codons. *Biosystems* 22: 177–87; 1989.

Watson J. D., Crick F. H. C. A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature* 171: 737–8; 1953.

الفصل الثالث: عملية البناء الضوئي

Allen J. F., Martin W. Out of thin air. *Nature* 445: 610–12; 2007.

Allen J. F. A redox switch hypothesis for the origin of two light reactions in photosynthesis. *FEBS Letters* 579: 963–68; 2005.

Dalton R. Squaring up over ancient life. *Nature* 417: 782–4; 2002.

Ferreira K. N. *et al.* Architecture of the photosynthetic oxygen-evolving center. *Science* 303: 1831–8; 2004.

Mauzerall D. Evolution of porphyrins—life as a cosmic imperative. *Clinics in Dermatology* 16: 195–201; 1998.

Olson J. M., Blankenship R. E. Thinking about photosynthesis. *Photosynthesis Research* 80: 373–86; 2004.

Russell M. J., Allen J. F., Milner-White E. J. Inorganic complexes enabled the onset of life and oxygenic photosynthesis. In *Energy from the Sun: 14th International Congress on Photosynthesis*, Allen J. F., Gantt E., Golbeck J. H., Osmond B. (editors). *Springer* 1193–8; 2008.

Sadekar S., Raymond J., Blankenship R. E. Conservation of distantly related membrane proteins: photosynthetic reaction centers share a common structural core. *Molecular Biology and Evolution* 23: 2001–7; 2006.

Sauer K., Yachandra V. K. A possible evolutionary origin for the Mn4 cluster of the photosynthetic water oxidation complex from natural MnO2 precipitates in the early ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99: 8631–6; 2002.

Walker D. A. The Z-scheme—Down Hill all the way. *Trends in Plant Sciences* 7: 183–5; 2002.

Yano J., *et al.* Where water is oxidised to dioxygen: structure of the photosynthetic Mn4Ca cluster. *Science* 314: 821–5; 2006.

الفصل الرابع: الخلية المعقدة

Cox C. J., *et al.* The archaebacterial origin of eukaryotes. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 105: 20356–61; 2008.

Embley M. T., Martin W. Eukaryotic evolution, changes and challenges. *Nature* 440: 623–30; 2006.

Javaeux E. J. The early eukaryotic fossil record. In: *Origins and Evolution of Eukaryotic Endomembranes and Cytoskeleton* (Ed. Gáspár Jékely); Landes Bioscience 2006.

Koonin E. V. The origin of introns and their role in eukaryogenesis: a compromise solution to the introns-early versus introns-late debate? *Biology Direct* 1: 22; 2006.

Lane N. Mitochondria: key to complexity. In: *Origin of Mitochondria and Hydrogenosomes* (Eds Martin W, Müller M); Springer, 2007.

Martin W., Koonin E. V. Introns and the origin of nucleus-cytosol compartmentalisation. *Nature* 440: 41–5; 2006.

Martin W., Müller M. The hydrogen hypothesis for the first eukaryote. *Nature* 392: 37–41; 1998.

Pisani D., Cotton J. A., Mclnerney J. O. Supertrees disentangle the chimerical origin of eukaryotic genomes. *Molecular Biology and Evolution* 24: 1752–60; 2007.

Sagan L. On the origin of mitosing cells. *Journal of Theoretical Biology* 14: 255–74; 1967.

Simonson A. B., *et al.* Decoding the genomic tree of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 102: 6608–13; 2005.

Taft R. J., Pheasant M., Mattick J. S. The relationship between non-protein-coding DNA and eukaryotic complexity. *BioEssays* 29: 288–99; 2007.

Vellai T., Vida G. The difference between prokaryotic and eukaryotic cells. *Proceedings of the Royal Society of London B* 266: 1571–7; 1999.

الفصل الخامس: التكاثر الجنسي

Burt A. Sex, recombination, and the efficacy of selection: was Weismann right? *Evolution* 54: 337–51; 2000.

Butlin R. The costs and benefits of sex: new insights from old asexual lineages. *Nature Reviews in Genetics* 3: 311–17; 2002.

Cavalier-Smith T. Origins of the machinery of recombination and sex. *Heredity* 88: 125–41; 2002.

Dacks J., Roger A. J. The first sexual lineage and the relevance of facultative sex. *Journal of Molecular Evolution* 48: 779–83; 1999.

Felsenstein J. The evolutionary advantage of recombination. *Genetics* 78: 737–56; 1974.

Hamilton W. D., Axelrod R., Tanese R. Sexual reproduction as an adaptation to resist parasites. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 87: 3566–73; 1990.

Howard R. S., Lively C. V. Parasitism, mutation accumulation and the maintenance of sex. *Nature* 367: 554–7; 1994.

Keightley P. D., Otto S. P. Interference among deleterious mutations favours sex and recombination in finite populations. *Nature* 443: 89–92; 2006.

Kondrashov A. Deleterious mutations and the evolution of sexual recombination. *Nature* 336: 435–40; 1988.

Otto S. P., Nuismer S. L. Species interactions and the evolution of sex. *Science* 304: 1018–20; 2004.

Szollosi G. J., Derenyi I., Vellai T. The maintenance of sex in bacteria is ensured by its potential to reload genes. *Genetics* 174: 2173–80; 2006.

الفصل السادس: الحركة

Amos L. A., van den Ent F., Lowe J. Structural/functional homology between the bacterial and eukaryotic cytoskeletons. *Current Opinion in Cell Biology* 16: 24–31; 2004.

Frixione E. Recurring views on the structure and function of the cytoskeleton: a 300 year epic. *Cell Motility and the Cytoskeleton* 46: 73–94; 2000.

Huxley H. E., Hanson J. Changes in the cross striations of muscle during contraction and stretch and their structural interpretation. *Nature* 173: 973–1954.

Huxley H. E., A personal view of muscle and motility mechanisms. *Annual Review of Physiology* 58: 1–19; 1996.

Mitchison T. J. Evolution of a dynamic cytoskeleton. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 349: 299–304; 1995.

Nachmias V. T., Huxley H., Kessler D. Electron microscope observations on actomyosin and actin preparations from *Physarum polycephalum*, and on their interaction with heavy meromyosin subfragment I from muscle myosin. *Journal of Molecular Biology* 50: 83–90; 1970.

OOta S., Saitou N. Phylogenetic relationship of muscle tissues deduced from superimposition of gene trees. *Molecular Biology and Evolution* 16: 856–67; 1999.

Piccolino M. Animal electricity and the birth of electrophysiology: The legacy of Luigi Galvani. *Brain Research Bulletin* 46: 381–407; 1998.

Richards T. A., Cavalier-Smith T. Myosin domain evolution and the primary divergence of eukaryotes. *Nature* 436: 1113–18; 2005.

Swank D. M., Vishnudas V. K., Maughan D. W. An exceptionally fast actomyosin reaction powers insect flight muscle. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 103: 17543–7; 2006.

Wagner P. J., Kosnik M. A., Lidgard S. Abundance distributions imply elevated complexity of post-paleozoic marine ecosystems. *Science* 314: 1289–92; 2006.

الفصل السابع: الإبصار

Addadi L., Weiner S. Control and Design Principles in Biological Mineralisation. *Angew Chem Int Ed Engl* 3: 153–69; 1992.

Aizenberg J., *et al.* Calcitic microlenses as part of the photoreceptor system in brittlestars. *Nature* 412: 819–22; 2001.

Arendt D., *et al.* Ciliary photoreceptors with a vertebrate-type opsin in an invertebrate brain. *Science* 306: 869–71; 2004.

Deininger W., Fuhrmann M., Hegemann P. Opsin evolution: out of wild green yonder? *Trends in Genetics* 16: 158-9; 2000.

Gehring W. J. Historical perspective on the development and evolution of eyes and photoreceptors. *International Journal of Developmental Biology* 48: 707–17; 2004.

Gehring W. J. New perspectives on eye development and the evolution of eyes and photoreceptors. *Journal of Heredity* 96: 171–84; 2005.

Nilsson D. E., Pelger S. A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve. *Proceedings of the Royal Society of London B* 256: 53–8; 1994.

Panda S., *et al.* Illumination of the melanopsin signaling pathway. *Science* 307: 600–604; 2005.

Piatigorsky J. Seeing the light: the role of inherited developmental cascades in the origins of vertebrate lenses and their crystallins. *Heredity* 96: 275–77; 2006.

Shi Y., Yokoyama S. Molecular analysis of the evolutionary significance of ultraviolet vision in vertebrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 100: 8308–13; 2003.

Van Dover C. L., *et al.* A novel eye in 'eyeless' shrimp from hydrothermal vents on the Mid-Atlantic Ridge. *Nature* 337: 458–60; 1989.

White S. N., *et al.* Ambient light emission from hydrothermal vents on the Mid-Atlantic Ridge. *Geophysical Research Letters* 29: 341–4; 2000.

الفصل الثامن: الدم الحار

Burness G. P., Diamond J., Flannery T. Dinosaurs, dragons, and dwarfs: the evolution of maximal body size. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 98: 14518–23; 2001.

Hayes J. P., Garland J. The evolution of endothermy: testing the aerobic capacity model. *Evolution* 49: 836–47; 1995.

Hulbert A. J., Else P. L. Membranes and the setting of energy demand. *Journal of Experimental Biology* 208: 1593–99; 2005.

Kirkland J. I., *et al.* A primitive therizinosauroid dinosaur from the Early Cretaceous of Utah. *Nature* 435: 84–7; 2005.

Klaassen M., Nolet B. A. Stoichiometry of endothermy: shifting the quest from nitrogen to carbon. *Ecology Letters* 11: 1–8; 2008.

Lane N. Reading the book of death. *Nature* 448: 122–5; 2007.

O'Connor P. M., Claessens L. P. A. M. Basic avian pulmonary design and flow-through ventilation in non-avian theropod dinosaurs. *Nature* 436: 253–6; 2005.

Organ C. L., *et al.* Molecular phylogenetics of Mastodon and Tyrannosaurus rex. *Science* 320: 499; 2008.

Prum R. O., Brush A. H. The evolutionary origin and diversification of feathers. *Quarterly Review of Biology* 77: 261–95; 2002.

Sawyer R. H., Knapp L. W. Avian skin development and the evolutionary origin of feathers. *Journal of Experimental Zoology* 298B: 57–72; 2003.

Seebacher F. Dinosaur body temperatures: the occurrence of endothermy and ectothermy. *Paleobiology* 29: 105–22; 2003.

Walter I., Seebacher F. Molecular mechanisms underlying the development of endothermy in birds *(Gallus gallus)*: a new role of PGC-1α? *American Journal of Physiology Regul Integr Comp Physiol* 293: R2315–22, 2007.

الفصل التاسع: الوعي

Churchland P. How do neurons know? *Daedalus* Winter 2004; 42–50.

Crick F., Koch C. A framework for consciousness. *Nature Neuroscience* 6: 119–26; 2003.

Denton D. A., *et al.* The role of primordial emotions in the evolutionary origin of consciousness. *Consciousness and Cognition* 18: 500–514; 2009.

Edelman G., Gally J. A. Degeneracy and complexity in biological systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 98: 13763–68; 2001.

Edelman G. Consciousness: the remembered present. *Annals of the New York Academy of Sciences* 929: 111–22; 2001.

Gil M., De Marco R. j., Menzel R. Learning reward expectations in honeybees. *Learning and Memory* 14: 49–96; 2007.

Koch C., Greenfield S. How does consciousness happen? *Scientific American* October 2007; 76–83.

Lane N. Medical constraints on the quantum mind. *Journal of the Royal Society of Medicine* 93: 571–5; 2000.

Merker B. Consciousness without a cerebral cortex: A challenge for neuroscience and medicine. *Behavioral and Brain Sciences* 30: 63–134; 2007.

Musacchio J. M. The ineffability of qualia and the word-anchoring problem. *Language Sciences* 27: 403–35; 2005.

Searle J. How to study consciousness scientifically. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 353: 1935–42; 1998.

Singer W. Consciousness and the binding problem. *Annals of the New York Academy of Sciences* 929: 123–46; 2001.

الفصل العاشر: الموت

Almeida A., Almeida J., Bolaños J. P., Moncada S. Different responses of astrocytes and neurons to nitric oxide: the role of glycolytically-generated ATP in astrocyte protection. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 98: 15294–99; 2001.

Barja G. Mitochondrial oxygen consumption and reactive oxygen species production are independently modulated: implications for aging studies. *Rejuvenation Research* 10: 215–24; 2007.

Bauer *et al.* Resveratrol improves health and survival of mice on a high-calorie diet. *Nature* 444: 280-81; 2006.

Bidle K. D., Falkowski P. G. Cell death in planktonic, photosynthetic microorganisms. *Nature Reviews in Microbiology* 2: 643–55; 2004.

Blagosklonny M. V. An anti-aging drug today: from senescence-promoting genes to anti-aging pill. *Drug Discovery Today* 12: 218–24; 2007.

Bonawitz N. D., *et al.* Reduced TOR signaling extends chronological life span via increased respiration and upregulation of mitochondrial gene expression. *Cell Metabolism* 5: 265–77; 2007.

Garber K. A mid-life crisis for aging theory. *Nature* 26: 371–4; 2008.

Hunter P. Is eternal youth scientifically plausible? *EMBO Reports* 8: 18–20; 2007.

Kirkwood T. Understanding the odd science of aging. *Cell* 120: 437–47; 2005.

Lane N. A unifying view of aging and disease: the double-agent theory. *Journal of Theoretical Biology* 225: 531–40; 2003.

Lane N. Origins of death. *Nature* 453: 583–5; 2008.

Tanaka M., *et al.* Mitochondrial genotype associated with longevity. *Lancet* 351: 185–6; 1998.